

Die Verwendung thermaler Infrarot-Aufnahmen bei geographischen Untersuchungen

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG
DER PHILOSOPHISCHEN DOKTORWÜRDE
vorgelegt der
PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT II
DER UNIVERSITÄT ZÜRICH

von

NIKOLAUS I. ITTEN
von Spiez (Kt. Bern)

1974

Begutachtet von Herrn Prof. Dr. H. Haefner



Juris Druck + Verlag Zürich
1973



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41507208_0061

Die Verwendung thermaler Infrarot-Aufnahmen bei geographischen Untersuchungen

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG
DER PHILOSOPHISCHEN DOKTORWÜRDE
vorgelegt der
PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT II
DER UNIVERSITÄT ZÜRICH

von

NIKOLAUS I. ITTEN
von Spiez (Kt. Bern)

Begutachtet von Herrn Prof. Dr. H. Haefner



Juris Druck + Verlag Zürich
1973



ISBN 3 260 03601 6

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1970 - 1973 am Geographischen Institut der Universität Zürich unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. H. Haefner. Ihm möchte ich für seine Unterstützung und seine stetige Bereitschaft, mich bei meinen Untersuchungen durch wertvolle Ratschläge zu leiten, ganz herzlich danken.

Herrn Prof. Dr. H. Boesch möchte ich danken, da er mir ermöglichte, an dem von ihm geleiteten Institut zu arbeiten und dadurch im Umgang mit Dozenten und Assistenten viele Anregungen zu erhalten.

Besonderer Dank gebührt Herrn Oberst i. Gst M. Loepfe, dem damaligen Chef der Luftaufklärung. Seinen Bemühungen und seiner tatkräftigen Unterstützung habe ich es zu verdanken, dass das Infrarot-Befliegungsprojekt durchgeführt werden konnte und damit diese Arbeit möglich wurde. Ihm, seinem Stab und seinen damaligen Piloten, unter ihnen besonders den Herren E. Bolli, H. Hürlimann, W. Böhm und U. Sohm bin ich zu Dank verpflichtet.

Herrn Prof. Dr. W. Berg danke ich, dass ich die Möglichkeit hatte, die Densitometermessungen am Photographischen Institut der ETHZ durchzuführen, und Herrn Dr. Seidel bin ich dankbar für die Beratungen und Hilfen bei meinen photographischen Auswerte- und Messproblemen.

Für die Ratschläge in mathematischer Hinsicht bin ich Herrn Prof. Dr. E. Batschelet vom Mathematischen Institut der Universität dankbar, und Herrn Prof. Dr. W. Kündig vom Physik-Institut der Universität danke ich für die Durchsicht der physikalischen Einleitung.

Danken möchte ich auch den Herren R. Véya und W. Schmid (NOK-Baden) für die wertvollen Hinweise zu den Bildern des Kernkraftwerkes Beznau, sowie auch Herrn Dr. G. Kritikos (DFVLR, Oberpfaffenhausen BRD), der für mich einen Bildanalyse-Versuch durchgeführt hat.

Herrn Prof. Dr. H. Wanner und Herrn Dr. B. Eller vom Institut für allgemeine Botanik der Universität Zürich und Herrn Dr. B. Primault von der Meteorologischen Zentralanstalt Zürich bin ich für die Ueberlassung der Infrarot-Strahlungsthermometer zu Dank verpflichtet.

Kaum eine andere Arbeit wie die vorliegende, erforderte einen derartigen Grosseinsatz von Messequipen, da bei jedem Flug möglichst viele Testobjekte zu erfassen und Bodenmessungen durchzuführen waren. Allen, die mir bei den Messungen oder durch allgemeine Ratschläge behilflich gewesen sind, besonders Herrn R. Gfeller sowie den Herren Prof. Dr. A. Kilchenmann, Dr. K. Brassel, Dr. W. Büchi, Dr. P. Fitze, Dr. R. Freund, Dr. K. Graf, Dr. H. U. Maag, Dr. A. Strüby, Frau A. Kienast und Frl. E. Leuzinger, den Herren R. Binzegger, K. Gassner, P. Gresch, H. Leuzinger, F. Riesen, F. Röthlisberger, P. Stutz, H. Trachsler und P. W. Vonderhorst möchte ich für die Hilfe danken.

Bei den Berechnungen auf dem Computer des Rechenzentrums der Universität Zürich waren mir die Herren Dr. G. Dorigo und F. Fasler in besonders verdankenswerter Weise behilflich.

Nicht zuletzt danke ich allen, welche mir in den letzten Jahren durch Ratschläge und in Diskussionen manche Anregung gegeben haben. Insbesondere aber danke ich meiner lieben Frau, die mir bei meinen Untersuchungen behilflich war und meiner Arbeit stetiges Verständnis entgegenbrachte.

Zürich, im Oktober 1973

Klaus I. Itten

Anmerkung des Verfassers

Sämtliche in dieser Arbeit gezeigten Luftbilder und Infrarot-Thermographien wurden durch den Luftaufklärungsdienst Dübendorf aufgenommen. Sie wurden hier reproduziert mit Bewilligung vom 5. Oktober 1973.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorwort	3
1. Einleitung	7
2. Infrarot Linescan Aufnahmen	11
2.1. Kurze physikalische Einführung	11
2.2. Atmosphärische Faktoren, die die Infrarot-Strahlung beeinflussen	11
2.3. Umgebungseinflüsse auf die Infrarot-Strahlung eines Objektes	11
2.4. Physikalische Gesetze der Infrarot-Strahlung	12
2.4.1. Kirchhoff'sches Gesetz	13
2.4.2. Planck'sches Gesetz	14
2.4.3. Stefan-Boltzmann'sches Gesetz	15
2.4.4. Wien'sches Verschiebungsgesetz	16
2.4.5. Quadratisches Abstandsgesetz	16
2.4.6. Lamberth'sches Cosinus Gesetz	16
2.5. Der optisch-mechanische Linescanner	17
2.6. Der Infrarot-Bildflug und die Bildfaktoren	19
3. Das Testprogramm	21
4. Das Testgebiet Mauensee	25
4.1. Lage	25
4.2. Instrumentelle Ausrüstung für die Bodenmessungen	26
4.3. Anbauverhältnisse im Untersuchungsgebiet	27
4.4. Bildbeispiele von Thermographien bei Tag und Nacht	28
4.5. Uebersicht über die Hauptversuche im Testgebiet Mauensee	31
5. Flugplanung und bei der Auswertung zu berücksichtigende Faktoren	33
5.1. Flugplanung	33
5.1.1. Einfluss des Sonnenstandes auf die zu wählende Flugrichtung	33
5.1.2. Der Einfluss des Testobjektes auf die Flugrichtung	34
5.2. Auswertung	34
5.2.1. Der Einfluss des Messwinkels zur Flugrichtung inbezug auf die Sonne	34
5.2.1.1. Bodenversuche	34
5.2.1.2. Interpretation der Messergebnisse der Versuche an den Fettwiesen (Fig. 14 - 21)	35
5.2.1.3. Interpretation der Messergebnisse am Asphalt (Messwerte s. Fig. 22-25)	39
5.2.1.4. Flugversuche	39
5.2.2. Einflüsse von scannerseitigen Fehlern und Möglichkeiten ihrer Korrektur	41
5.2.3. Spezielle Einflüsse	44
6. Der Zusammenhang zwischen Infrarot-Emission ($8-14\ \mu$) und meteorologischen Faktoren	47
6.1. Ueberprüfung der PRT-10 Bodenmessdaten	47
6.2. Vergleich zwischen den PRT-10- und den $8-14\ \mu$ Scannermessungen	49
6.3. Das Kalibrieren der $8-14\ \mu$ Infrarot-Strahlungstemperaturen	50
6.4. Der Zusammenhang zwischen meteorologischen Faktoren und der thermalen Infrarot-Emission im Bereich $8-14\ \mu$	51
6.4.1. Einleitung	51
6.4.2. Die multiple lineare Regressions- und Korrelationsanalyse	52

6.4.3. Berechnungen des Zusammenhangs zwischen Infrarot-Strahlungstemperaturen der Felder zum Zeitpunkt des Ueberflugs und den meteorologischen Parametern zu verschiedenen Zeiten vor, während und nach dem Ueberflug	53
6.4.3.1. Meteofaktoren gemessen beim Ueberflug	53
6.4.3.2. Meteofaktoren gemessen 1 Std. nach dem Ueberflug	56
6.4.3.3. Meteofaktoren gemessen 2 Std. nach dem Ueberflug	58
6.4.3.4. Meteofaktoren gemessen 4 Std. nach dem Ueberflug	60
6.4.3.5. Meteofaktoren gemessen 1 Std. vor dem Ueberflug	60
6.4.3.6. Meteofaktoren gemessen 2 Std. vor dem Ueberflug	63
6.4.3.7. Meteofaktoren gemessen 4 Std. vor dem Ueberflug	65
6.4.4. Zusammenfassung der Resultate der Regressionsrechnungen	65
7. Quantitative Auswertung der 3-5 μ Daten	67
8. Einige Beispiele zur Anwendung der Infrarot-Technik im Testgebiet Mauensee	69
8.1. Versuch einer Trennung der landwirtschaftlichen Kulturen im Bereich 8-14 μ der Infrarot-Strahlung	69
8.2. Versuch einer Trennung der landwirtschaftlichen Kulturen im Bereich 3-5 μ der Infrarot-Strahlung	74
8.3. Versuch einer Trennung der landwirtschaftlichen Kulturen durch die Kombination von 3-5 μ und 8-14 μ Strahlungstemperaturen	75
8.4. Zusammenhang zwischen Bodenfeuchtigkeit und Infrarot-Strahlungstemperatur unbewachsener Böden	75
9. Beispiele von weiteren Anwendungen der Infrarot-Technik bei geographischen Untersuchungen	77
9.1. Der Kontakt von Wassermassen unterschiedlicher Temperatur	77
9.1.1. Das Einfließen der Aare in den Bielersee bei Hagneck (Fig. 57)	78
9.1.2. Das Einfließen der Linth in den Zürcher-Obersee (Fig. 58)	79
9.1.3. Thermale Gewässerbelastung durch das Kühlwasser eines Kernkraftwerkes (Fig. 59)	81
9.2. Allgemeine Gewässerüberwachung	82
9.2.1. Gewässerüberwachung am Beispiel Klingnauer Stausee (Fig. 60)	83
9.2.2. Gewässerüberwachung am Beispiel Bodensee (Fig. 61)	84
9.3. Untersuchungen im Hochgebirge	85
9.3.1. Tagaufnahmen von tauenden Schnee- und Firnflecken am Sidelhorn zwischen Toten- und Trübtensee im Oberaarmassiv (Fig. 62)	85
9.3.2. Tagaufnahmen des Oberaargletschers (Fig. 63)	86
9.3.3. Nachtaufnahme des Oberaargletschers (Fig. 64)	88
9.3.4. Tagaufnahmen im Firnbereich des Oberaargletschers (Fig. 65)	89
9.3.5. Nachtaufnahme im Firnbereich des Oberaargletschers (Fig. 66)	90
9.3.6. Nacht-Thermographie des Konkordiaplatzes (Aletschgletscher) (Fig. 67)	91
9.3.7. Nacht-Thermographie des Aletschfirns im Bereich 8-14 μ (Fig. 68)	92
9.4. Untersuchungen im Karst des Neuenburger Juras (Fig. 69)	93
9.5. Geländedarstellung im alpinen Bereich (Fig. 70)	95
9.6. Abschliessende Bemerkungen und Ausblick	96
Zusammenfassung	97
Summary	98
Literaturverzeichnis	99

1. EINLEITUNG

Seit Jahrzehnten ist die Bedeutung des Luftbildes bei geographischen Untersuchungen bekannt, bietet es doch zugleich Ueberblick und Einblick in das Landschaftsgefüge. Das abgebildete Objekt kann in seinem Kontext zur Umgebung, in seinen Beziehungen zu Nachbarobjekten untersucht werden und vermittelt sowohl quantitative wie auch qualitative Aussagen.

Wenn terrestrische Untersuchungen sehr zeitraubend sind oder überhaupt nicht durchgeführt werden können, ist das Luftbild oft einziges Mittel, die gewünschten Resultate oder Teile davon zu erbringen.

Es ist typisch, dass sich die Methoden der Auswertung und Interpretation von Luftbildern vor allem in der Geographie stark entwickelt und verbreitet haben. Typisch deshalb, weil die Geographie eine verbindende Stellung zwischen den einzelnen Disziplinen der Erdwissenschaften einnimmt und versucht eine synthetische Gesamtschau zu vermitteln. Typisch auch deshalb, weil ein Luftbild ebenso ein interdisziplinäres Studienmedium darstellt, werden doch in den seltensten Fällen ausschliesslich fachgebundene Untersuchungsobjekte abgebildet.

Das konventionelle Luftbild hat sich darum so stark verbreitet, weil bei der Interpretation Auswahl- und Entscheidungskriterien angewendet werden, die auch im täglichen Leben gebräuchlich sind. Durch die Verbreitung der Photographie ganz allgemein ist jedermann gewohnt, farbige oder schwarz-weiße Bilder anzusehen und zu bewerten. Auch die beim Luftbild hinzukommenden Probleme der Vogelperspektive sind relativ einfach lösbar, da sie unserer bildhaften Vorstellung entsprechen.

Die Schwierigkeiten beginnen aber dann, wenn beispielsweise bei einem Falschfarben Nah-Infrarotbild die Farben und Tönungen nicht mehr dem ausgegewohnten Bild entsprechen. Hier muss die genaue Kenntnis der elektrophysikalischen Gesetze die versagende Logik ergänzen. Dies gilt bei der Interpretation von Bildern mittels Röntgenstrahlung und im Ultraviolettbereich ebenso sehr, wie in den verschiedenen Bereichen des Infrarots, der Mikrowellen, der Radarwellen, der Audiowellen etc. ...

In der vorliegenden Arbeit soll im Bereich der thermalen Infrarot-Strahlung¹⁾ untersucht werden, welche Gesetze bei der Flugplanung, der Durchführung und bei der Interpretation von Thermographien²⁾ (sog. Wärmebildern) beachtet werden müssen und wieweit solche Methoden bei geographischen Fragestellungen in unseren Breiten Verwendung finden können.

In sehr vielen Bereichen der Technik und Naturwissenschaften hat sich die Anwendung von Aeromethoden im thermalen Infrarot bestens bewährt.

1) Definition s. Fig. 1, Seite 12

2) Mit Thermographien werden unkalibrierte qualitativ interpretierbare Bilder bezeichnet im Gegensatz zu Thermogrammen, die quantitativ ausgewertet werden können und von kalibrierten Systemen stammen.

Es seien hier nur einige wichtige aufgeführt:

- | | |
|--------------------------------|--|
| - Meteorologie | Temperaturprofile der Atmosphäre
Untersuchungen tropischer Wirbelstürme
Luftfeuchtigkeitsprofile |
| - Geologie | geologische Kartierung
Vulkanologie |
| - Hydrologie | Kartierung von Gewässernetzen
Schneeschnelzbestimmung, Abflussmengenberechnung
Verschmutzungsüberwachung von Seen und Flüssen
Registrierung von Wassertemperaturen- und Strömungen
Grundwasseruntersuchungen |
| - Ozeanologie | Wassertemperaturstudien und Strömungsuntersuchungen
Grundwasseraufstösse an Meeresküsten
Eisbergüberwachung
Auffinden von Verschmutzungen, insbes. Entdecken von Oellecks
Biologisch-marine Untersuchungen, Fischfang |
| - Land- und
Forstwirtschaft | Bodentypisierung, Bodenfeuchtigkeitsuntersuchungen
Kontrolle von Massnahmen zur Ent- oder Bewässerung
Wuchsschädenerkennung und Optimierung der Schädlingsbekämpfung an
Pflanzenbeständen
Wald- und Steppenbrand-Erkennung und gezielte Bekämpfung |
| - Industrie- und
Bergbau | Überwachung von Untergrundbränden in Kohlenminen
Überwachung von Hochspannungsleitungen, von Pipelines für Erdöl und
Erdgas etc. |

Die Bedeutung des Thermal-Infrarots im gesamten Spektrum der Verfahren der Fernerkundung, des "remote sensing of environment"¹⁾ ist danach sicher unbestritten. Offen ist aber die Frage, wieweit die erwähnten Methoden in der geographischen Forschung anwendbar sind, und wieweit man sich auf bereits durchgeführte Untersuchungen in anderen Klimazonen stützen kann.

Sicher ist es verfehlt zu glauben, dass dieses relativ neue Mittel die Lösung unserer sämtlicher Umweltprobleme birgt. Vielmehr stellen thermale Infrarot-Aufnahmen eine Bereicherung der Methoden des "remote sensing" dar, die zu den bereits bekannten Resultaten aus Labor- und Felduntersuchungen, aus Interpretationen von Luftphotographien etc. eine wertvolle Erweiterung der Möglichkeiten zur Datenbeschaffung bieten.

Genau wie bei anderen Bereichen der Fernerkundung ist das Mittel der Thermal-Infrarot-Aufnahme für die eine Aufgabe nicht, dafür aber für eine andere hervorragend geeignet. Um in dieser generellen Fragestellung Anhaltspunkte zu gewinnen, genügt die Verwendung von qualitativen Scannern wie in dieser Arbeit völlig. Für quantitative Untersuchungen, wenn es um messbare Grössen etc. geht, dann wird der Einsatz von kalibrierten Geräten unumgänglich.

Vor allem in den USA wurden viele Studien zu diesem Thema durchgeführt. Dies ist einerseits dadurch begründbar, dass dort die Entwicklung von Infrarot-Bildgeräten durch die Verknüpfung

1) "remote sensing of environment", z. Deutsch Fernerkundung, Französisch "télédetection à distance" bedeutet Messung von Objekteigenschaften, ohne dass sich dabei Messobjekt und Messinstrument berühren.

in kriegerische Ereignisse besonders gefördert wurde. Andererseits wurde aber gerade dadurch eine weltweite Anwendung und zivile Verbreitung verhindert.

Durch gesetzlich fixierte Leistungen ziviler Geräte war es langezeit nicht möglich, dass in diesem Bereich mit brauchbaren Auflösungen operiert werden konnte. Die anfänglich zur Verfügung stehenden veralteten, militärischen Geräte konnten nicht besonders beeindrucken, da sie unkalibrierte Werte rein qualitativer Art erbrachten. Doch allmählich liberalisierte sich die restriktive Politik im zivilen Gerätebau, da in vielen anderen Ländern mit dem Bau solcher Infrarot-Scanner¹⁾ begonnen wurde. Heute nun stehen für qualitative wie für quantitative Untersuchungen eine ganze Reihe von ausgezeichneten Geräten zur Verfügung.

Allerdings sind die Investitionskosten für solche Scanner sehr gross, sodass für gezielte Untersuchungen die Geräte meistens bei den Herstellern gemietet werden. Obwohl viele nutzbringende Anwendungen bekannt und erprobt sind, scheint der Markt nicht besonders gut erschlossen zu sein. In Europa sind nur sehr wenige quantitative Scanner vorhanden. Auch in unserem Falle mussten die Untersuchungen mit unkalibrierten Geräten durchgeführt werden.

Im Sommer 1971 konnten im Rahmen eines grösseren Flugprogrammes des Luftaufklärungsdienstes (LAD) mit Infrarot-Bildgeräten Aufnahmen für geographische Zwecke durchgeführt werden.

Seit Jahren beschäftigt man sich am Geographischen Institut der Universität Zürich mit den Problemen der Fernerkundung, deren Anwendung und darum auch mit Methoden der Infrarot-Aufnahme und Auswertung von Thermalbildern. Es bot sich hier also eine ausgezeichnete Gelegenheit, die theoretischen Kenntnisse in der Praxis anwenden zu können. Trotz der Kenntnis um die gerätetechnischen Unzulänglichkeiten für quantitative Untersuchungen grösseren Stils, zeigte es sich sehr schnell, dass die Aufnahmen geeignet waren, den geographischen Arbeitsbereich interdisziplinär auszuweiten, und dass sie Anlass zu einer Fülle von neuen Themenkreisen und Verbindungen boten.

Es geht in dieser Arbeit nicht um eine vollumfassende Darstellung der technischen Probleme und der Anwendungsmöglichkeiten. Vielmehr wird beabsichtigt, das Gespräch in diesem Fachbereich in der Schweiz in Gang zu setzen und möglichst viele Anregungen zu bieten. Für umfassende Lehrbücher und weitere bekannte Anwendungen im thermalen Infrarot sei auf die umfangreiche Literaturliste hingewiesen.

Bei insgesamt 26 Flügen konnten nach unseren Zielsetzungen und Problemstellungen Infrarot-Aufnahmen (bei Tag und bei Nacht) erstellt werden. Eine genaue Uebersicht über die Flüge und der darin erfassten Themenbereiche gibt Kapitel 3. Durch die Staffelung der Flüge über einen Zeitraum von 4 Wochen wurde es möglich, Einblick zu gewinnen in den Zusammenhang zwischen der thermalen Infrarot-Strahlung und einigen wichtigen meteorologischen Parametern, die dank kontinuierlicher Registrierung im Testgebiet "Mauensee" zur Verfügung standen. Diese Untersuchungen bilden das Kernstück der vorliegenden Arbeit. Daneben wurde versucht in einem grösstmöglichen Spektrum von Anwendungen die Bereicherung aufzuzeigen, die die Geographie und die Erdwissenschaften ganz allgemein durch die Infrarot-Technik erfahren können.

1) Infrarot-Scanner = Infrarot-Bildabtaster, Beschreibung s. Kap. 2.5.

Insbesondere wurden folgende Probleme bearbeitet:

- das Strahlungsverhalten landwirtschaftlicher Flächen über einen längeren Zeitraum hinweg. Bei den Versuchen im Testgebiet "Mauensee" interessierte vor allem der Zusammenhang zwischen der Infrarot-Strahlungstemperatur der einzelnen Felder und den meteorologischen Parametern Lufttemperatur, relative und spezifische Luftfeuchtigkeit sowie Windgeschwindigkeit. Diese Untersuchungen bildeten die Voraussetzung zum Versuch einer landwirtschaftlichen Kulturenidentifikation. Ausserdem wurde der Versuch unternommen die Feuchtigkeit unbewachsener Böden aufgrund von Thermographien zu bestimmen.
- das Einfließen von Flüssen in Seen an den Beispielen Linth, Aare, Broye, Lorze und Rhone. Bei Gewässerschutzfragen spielt die Durchmischung zufließender Gewässer mit dem Seewasser eine wichtige Rolle.
- Seeuferüberwachung an den Beispielen Bodensee, Obersee, Zugersee, Klingnauer-Stausee, Neuenburger- und Bielersee. Spezielle Erscheinungen können auftreten bei gewässerschutzlich durchgeführten Seeuferbefliegungen zur Wasseroberflächentemperaturmessung und zur Detektion von Verschmutzungen.
- die Indikation der thermalen Gewässerbelastung durch Flusswasserkühlung bei Atomkraftwerken durch Thermalaufnahmen.
- Gletscher- und Schneeuntersuchungen am Profil Oberaar-Lötschental. Die Frage wird abgeklärt, inwieweit bei diesen Anwendungen thermale Infrarot-Aufnahmen zusätzliche Informationen zu panchromatischen Bildern bieten können.
- die Möglichkeiten der Geländedarstellung in den beiden Infrarot-Bereichen an den Beispielen des Karsts im Neuenburger-Jura und dem alpinen Dischmatal.

Bei dieser Fülle von Anwendungen und dem entsprechenden Anfall von Daten, musste für den vorliegenden Bericht eine Auswahl getroffen werden, sodass zu jedem Themenbereich an mindestens einem Beispiel die Probleme erläutert werden konnten.

Von der aufnahmetechnischen Seite standen folgende Mittel zur Verfügung: Das Flugzeug war ausgerüstet mit 2 Scannern, - einem "Reconofax-VT" der Firma HRB-Singer Inc. mit einem $3 - 5 \mu$ Detektor und einem "Linescan 212" von Hawker Siddeley Dynamics (HSD) im Bereich von $8 - 14 \mu$. Diese beiden Geräte konnten simultan eingesetzt werden. Die erwähnten Unzulänglichkeiten erschwerten eine quantitative Auswertung der Daten, da beide Scanner unkalibrierte Werte lieferten. Die Infrarot-Daten standen als zeilenweise belichtete Filme zur Verfügung, da eine Aufnahme der Detektorsignale auf Tonband im Flug nicht möglich war.

Leider konnten nur in einigen wenigen Fällen parallel zu den Scanner-Aufnahmen panchromatische Reihenbilder erstellt werden. Der Vergleich zwischen den 3 Bereichen wäre sicher sehr interessant gewesen.

Trotz diesen Einschränkungen war es eine einmalige Gelegenheit zu den Infrarot-Daten überhaupt zu gelangen. Wie diese Untersuchung zeigt, lassen sich auch damit einige sehr aufschlussreiche Aspekte bearbeiten.

2. INFRAROT LINESCAN AUFNAHMEN

2.1. Kurze physikalische Einführung

Jeder Körper, dessen Temperatur über derjenigen des absoluten Nullpunktes (0° Kelvin) liegt, strahlt im Bereich des elektromagnetischen Spektrums Energie aus. Der Wellenlängenbereich des Infrarots erstreckt sich dabei von $0.72 - 1000 \mu$ (Hudson 1969). Durch die Messung der Infrarot-Strahlung und deren Veränderungen lassen sich Aussagen machen über viele physikalische und chemische Prozesse. Thermal-Detektoren ermöglichen die Erfassung der Infrarot-Strahlung, indem sie einerseits durch die Einwirkung der Strahlung direkt Spannung erzeugen (engl. "photovoltaic detectors") oder aber ihren elektrischen Widerstand ändern (engl. "photoconductive detectors"). Damit ist eine punktweise und linienweise Messung möglich, und darauf basiert auch die zeilenweise bildhafte Darstellung.

Bei der Fernerkundung geht es um Messungen, bei denen Instrument und Messobjekt nicht miteinander in direktem Kontakt sind, d.h. die Strahlung muss zuerst einen Teil der Atmosphäre durchdringen, bevor sie auf den Sensor trifft. Die Atmosphäre ist, da die in ihr enthaltenen Festpartikel und Gase als Selektivfilter wirken, in gewissen Bereichen des Infrarots undurchlässig oder nur schwach durchlässig. Daneben gibt es Wellenlängenbereiche, in denen die Strahlung mehr oder weniger ungehindert passieren kann. Daraus ergibt sich eine klare Gliederung des Infrarot-Spektrums. Fig. 1 gibt einen Ueberblick über die Gliederung des gesamten elektromagnetischen Spektrums sowie die Darstellung der Transmission der Atmosphäre.

Für Infrarot-Messungen bieten sich besonders die zwei atmosphärischen Fenster von $3 - 5 \mu$ und von $8 - 14 \mu$ an. Bei den durchgeführten Flugversuchen wurde dann auch je ein Scanner pro Fenster eingesetzt.

- 3 - 5μ HRB-Singer Reconofax VI mit InSb-Detektor (Indium-Antimonid)
- 8 - 14μ HSD-Linescan 212 mit CdHgTe-Detektor (Cadmium-Quecksilber-Tellurid)

2.2. Atmosphärische Faktoren, die die Infrarot-Strahlung beeinflussen

Vor allem sind die folgenden wichtig:

- Wasserdampf H_2O
- Kohlendioxyd CO_2
- Ozon O_3
- Stickstoff NO_2

2.3. Umgebungseinflüsse auf die Infrarot-Strahlung eines Objektes

Um die Komplexität der ganzen Fragestellungen zu zeigen, seien hier die wichtigsten Einflüsse aufgezählt:

- Lufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Luftdruck
- Windgeschwindigkeit und -Richtung
- Tages- resp. Nachtzeit
- Jahreszeit
- Sonnenstand und Sonneneinstrahlung
- Strahlungsvorgeschichte
- Niederschlag und Niederschlagsvorgeschichte
- Einflüsse durch Nachbarobjekte etc.

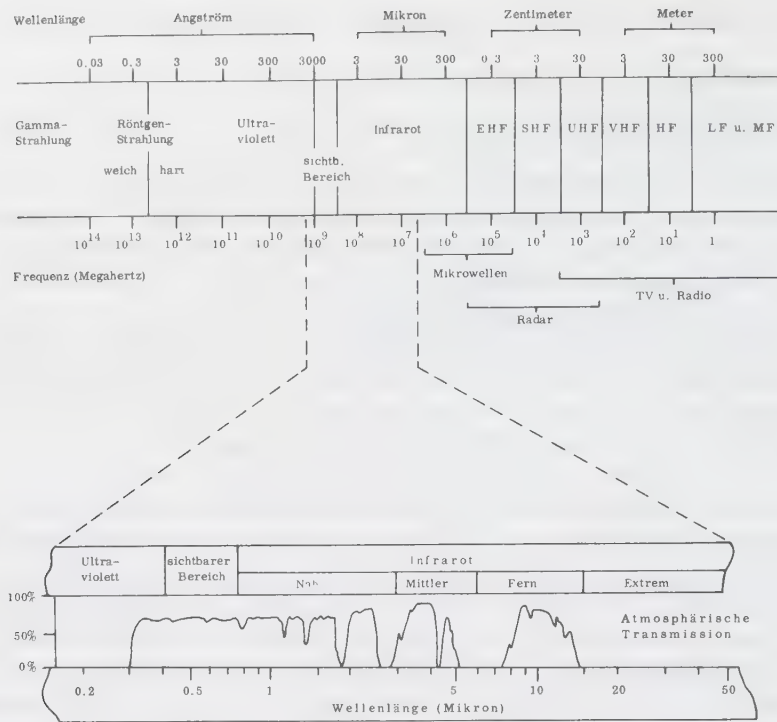


Fig. 1 Uebersicht über die Gliederung des elektromagnetischen Spektrums und die Darstellung der Transmission der Atmosphäre im Bereich zwischen Ultraviolett und Infrarot¹⁾ (nach US Dept. of Def. 1954 und Hudson 1969)

- 1) Die Bereiche 3 - 5 μ und 8 - 14 μ gehören zum mittleren resp. fernen Teil des thermalen Infrarots. Streng genommen darf aber bei Tagmessungen nur der Bereich 8 - 14 μ dazu gezählt werden, da man im 3 - 5 μ Bereich nicht nur thermale Emission sondern auch Reflexion von Sonnen-Strahlung empfängt. Dadurch werden z.B. geothermische Untersuchungen bei direkter Sonneneinstrahlung erschwert, weil die reflektierte Strahlung die thermal emittierte überdeckt.

2.4. Physikalische Gesetze der Infrarot-Strahlung

Jedes Objekt strahlt Energie in der Form elektromagnetischer Wellen aus. Objekte erhalten Energie von natürlichen und künstlichen Quellen. Die Hauptquelle der Natur ist die Sonne. Sie erwärmt die Erdoberfläche und diese wiederum strahlt elektromagnetische Energie mit einem Strahlungsmaximum im fernen Infrarot aus. Als Mass der inneren Energie eines Körpers dient seine Temperatur.

2.4.1. Kirchhoff'sches Gesetz

Kirchhoff sagt, dass gute Absorber gute Strahler sind. Er definiert den schwarzen Strahler (od. schwarzen Körper = engl. "blackbody") als einen Körper, der alle einfallende Strahlung absorbiert und ein Höchstmass an thermischer Energie durch Emission abgibt. Mit diesem idealen, theoretischen schwarzen Körper werden sämtliche anderen, nicht optimal strahlenden Körper (= graue Strahler, engl. "greybodies") verglichen, wobei der Emissionsfaktor e (auch Emissionsgrad genannt) definiert wird als:

$$e = \frac{\text{Total emittierte Strahlung des grauen Körpers}}{\text{Total emittierte Strahlung des schwarzen Körpers}}$$

Grössenmässig liegt der Emissionsfaktor damit immer zwischen 0 und 1. Er ist letztlich eine Funktion des Materials aus dem er besteht und seiner Oberflächenbeschaffenheit. In der folgenden Tabelle sind die Emissionskoeffizienten einiger Materialien aufgeführt.

Tab. 1 Einige Emissionsfaktoren

poliertes Aluminium	bei 100°C	e = 0,05
polierter Stahl	" 100°C	e = 0,07
oxydierter Stahl	" 200°C	e = 0,79
Lampenruss (oft als Schwarzkörperanstrich verwendet)	" 20°C	e = 0,95
Beton	" 20°C	e = 0,92
Glas	" 20°C	e = 0,94
Sand	" 20°C	e = 0,90
menschl. Haut	" 32°C	e = 0,98
trockener Boden	" 20°C	e = 0,92
feuchtigkeitsgesättigter Boden	" 20°C	e = 0,95
destilliertes Wasser	" 20°C	e = 0,96
Eis	" - 10°C	e = 0,96
Schnee	" - 10°C	e = 0,85

(nach Hudson 1969)

2.4.2 Planck'sches Gesetz

Es umschreibt die spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers (s.Bpl.Fig. 2) in der Form:

$$W_{(\lambda)} = c_1 \frac{1}{\lambda^5 \cdot (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (1)$$

wobei:

- $W_{(\lambda)}$ = Spektrale spezifische Ausstrahlung, $\text{W cm}^{-2} \mu^4$
- λ = Wellenlänge, μ
- $c_1 = 2\pi^5 h c^2 (= 3,74 \cdot 10^4 \text{ W cm}^{-2} \mu^4)$
- $c_2 = hc/k (= 1,44 \cdot 10^4 \mu^{\circ}\text{K})$
- h = Planck'sche Konstante $(= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Wsec}^2)$
- c = Lichtgeschwindigkeit $(= 3,00 \cdot 10^8 \text{ msec}^{-1})$
- k = Boltzmann'sche Konstante $(= 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Wsec}^{\circ}\text{K}^{-1})$

Aus der spektralen spezifischen Ausstrahlung (1) ergibt sich die von der Einheit der strahlenden Fläche in den Halbraum emittierte Energie im Wellenlängenbereich von λ_1 bis λ_2 mit:

$$W_{\lambda_1 \dots \lambda_2} = c_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^5 \cdot (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (2)$$

wobei in unserem Falle mit λ_1 bis λ_2 die Wellenlängenbereiche $3 - 5 \mu$ resp. $8 - 14 \mu$ einzusetzen sind.

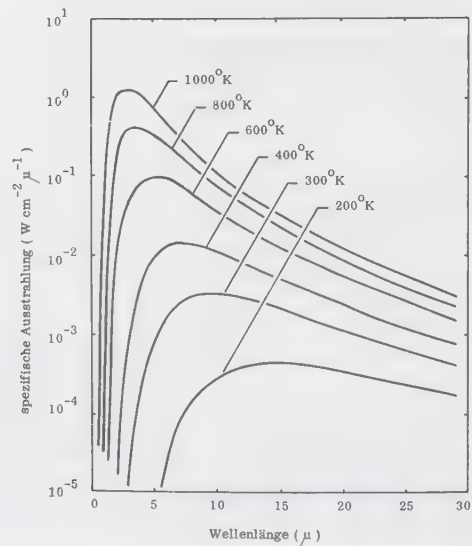


Fig. 2: Spektrale Verteilung der Strahlungsenergie von schwarzen Körpern unterschiedlicher Temperatur.

Aus dem Gesetz von Planck geht hervor, dass sich die spektralen Verteilungskurven von schwarzen Körpern verschiedener Temperatur nicht kreuzen. Dies bedeutet aber wiederum, dass bei einer Messung eines Objektes in einem bestimmten Abschnitt des Infrarot-Spektrums, die Temperatur eines vergleichbaren schwarzen Strahlers (EBBR = engl. "equivalent blackbody radiator") eindeutig bestimmt werden kann.

Die Annahme, natürliche Objekte verhalten sich wie graue Körper, ist nur eine vereinfachende Näherung, die z. T. auch nur für kleinere Wellenlängenbereiche gilt (Fig. 3).

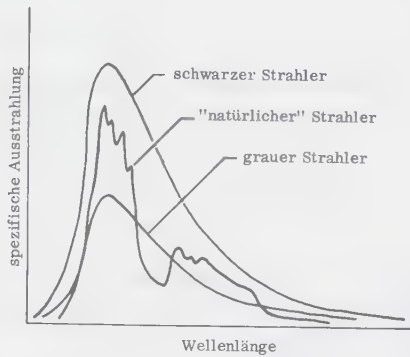


Fig. 3: Spektrale Emission dreier Typen von Strahlern

2.4.3. Stefan-Boltzmann'sches Gesetz

Durch die Integration der Formel (2) des Planck'schen Gesetzes über den Wellenlängenbereich von 0 bis ∞ ergibt sich das Stefan-Boltzmann Gesetz, das besagt, dass die total emittierte Strahlung eines schwarzen Körpers proportional ist zur 4. Potenz der absoluten Temperatur.

$$\underline{W = \sigma \cdot T^4} \quad (\text{nur für schwarze Körper}) \quad (3)$$

Für graue Körper (nicht ideale Strahler) gilt demnach

$$\underline{W = e \cdot \sigma \cdot T^4} \quad (4)$$

wobei:

- e = Emissionsfaktor
- σ = Stefan-Boltzmann Konstante ($5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Wcm}^{-2} \cdot \text{°K}^{-4}$)
- T^4 = 4. Potenz der absoluten Temperatur
- W = total emittierte Strahlung

2.4.4. Wien'sches Verschiebungsgesetz

Differenziert man die Formel (1) des Planck'schen Gesetzes und bestimmt dadurch das Maximum der spektralen Verteilungskurve, so ergibt sich das Wien'sche Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{\max} \cdot T = a \quad (a = 2897.9 \mu^{\circ}\text{K}) \quad (5)$$

oder

$$\lambda_{\max} = \frac{2897.9 \mu^{\circ}\text{K}}{T} \quad (6)$$

Bei den folgenden Beispielen können nur Näherungswerte mit der obigen Formel ermittelt werden, da sie nur für schwarze Körper gilt. Den Emissionsfaktoren der Tabelle können wir aber entnehmen, dass die erwähnten Objekte dem idealen schwarzen Körper recht nahe kommen. Durch diese einfachen Rechnungen können die optimalen Messbereiche für jede Anwendung ermittelt werden.

Allgemein kann man dem Gesetz entnehmen, dass bei einer Erhöhung der Temperatur eines Objektes die Intensität und die Frequenz des Strahlungsmaximums sich ebenfalls erhöhen, die Wellenlänge dagegen abnimmt.

Beispiele:	Schnee/Eis von	$-10^{\circ}\text{C} = 263^{\circ}\text{K}$	$\lambda_{\max.S} =$	11.0μ
	Wasser od. Land-	$27^{\circ}\text{C} = 300^{\circ}\text{K}$	$\lambda_{\max.W} =$	9.6μ
	masse von ca.			
	Vulkanlava von	$600^{\circ}\text{C} = 873^{\circ}\text{K}$	$\lambda_{\max.L} =$	3.3μ

Wie bereits früher erwähnt, sollen sich bei der Messung das Instrument und das Messobjekt nicht berühren. Es sind also ausser den primären Infrarot-Gesetzen noch einige Regeln der Messgeometrie zu beachten.

2.4.5. Quadratisches Abstandsgesetz

Die Intensität der Strahlung einer Punktquelle ändert sich mit dem reziproken Quadrat der Distanz zum Messobjekt.

2.4.6. Lamberth'sches Cosinus Gesetz

Die Strahlungsintensität einer ebenen (horizontalen) Fläche ändert sich mit dem Cosinus des Winkels zwischen der Messrichtung und der Senkrechten auf die Fläche. Den beiden Regeln entgegen wirkt die Tatsache, dass der zu messende Messfleck (IFV = Gesichtsfeld = engl. "instantaneous field of view") sich mit $\frac{1}{\cos^2 \theta}$ des Winkels zwischen Messrichtung und der Senkrechten vergrössert und die gemessene Strahlungsmenge dadurch grösser wird.

Zusätzlich muss bei streng quantitativen Untersuchungen eine ganze Reihe von Gesetzen zur atmosphärischen Beeinflussung der Infrarot-Strahlung beachtet werden (u.a. Lorenz 1970, 1971 u. 1973).

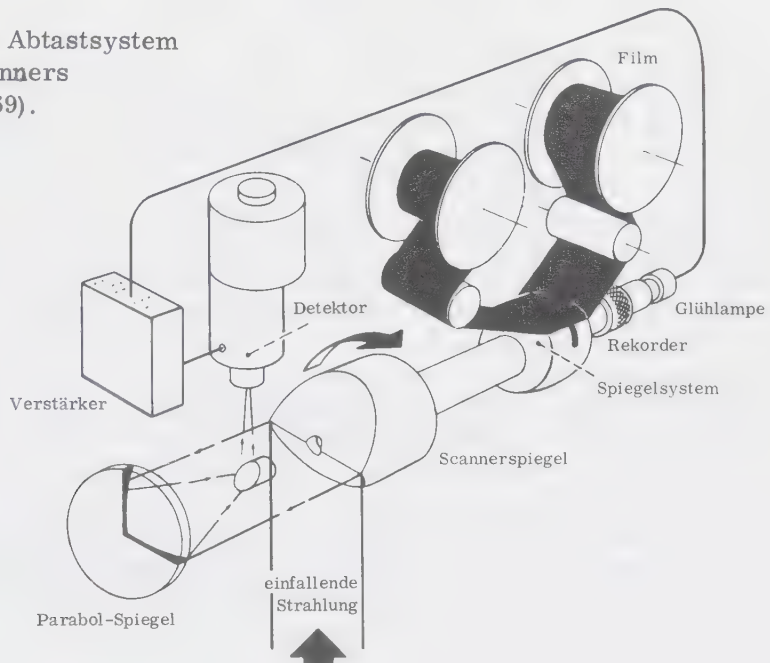
Bei den Testflügen wurde darum versucht, durch möglichst geringe Flughöhen ($< 300 \text{ m/GND}$) die Fehler, die insbesondere durch Wasserdampf und CO_2 in der Atmosphäre hervorgerufen werden, klein zu halten. Bei besonderen meteorologischen Verhältnissen (Nebel, starker Dunst etc.) traten diese Einflüsse trotzdem zutage.

Diese physikalischen Gesetze müssen einerseits bei der Konstruktion der Messgeräte, aber auch bei der Messung selbst beachtet werden, und nicht zuletzt müssen sie dem Interpreten bekannt sein, damit er keine falschen Schlüsse aus seinen Beobachtungen zieht.

2.5 Der optisch-mechanische Linescanner

Vereinfacht kann die Funktionsweise eines Scanners folgendermassen erklärt werden (Bpl. System Reconofax VI)¹⁾

Fig. 4: Optisch - mechanisches Abtastsystem des "Reconofax-VI" Scanners
(nach HRB - Singer, 1969).



Der in Rollbewegung des Flugzeuges rotierende Spiegel lenkt die Infrarotstrahlung über Spiegelsysteme und Optiken auf den mit flüssigem Helium oder Stickstoff gekühlten Detektor. Dieser ändert seine elektrophysikalischen Eigenschaften proportional zur einfallenden Strahlung. Ueber Verstärkersysteme wird eine Glühlampe, eine Kathodenstrahlröhre oder ein Laser durch das Detektorsignal intensitätsmoduliert. An diesen Lichtquellen wird proportional zum Verhältnis Fluggeschwindigkeit/Flughöhe (V/H) ein photographischer Film vorbeigeführt und belichtet. Durch die mit fortschreitender Flugbewegung zeilenweise Belichtung des Filmes wird ein Infrarot-Wärmebild erzeugt, das mit einer Infrarot-Photographie nichts gemeinsam hat. Im englischen Sprachgebrauch verwendet man auch den Begriff der "infrared-imagery", im Gegensatz zur "infrared-photography"

1) Optisch-mechanisches Abtastsystem beim HSD Linescan 212, $8 - 14 \mu$ Scanner
s. Kapitel 5.2.2, Fig.28.

Moderne quantitative Scanner sind mit internen Schwarzkörper-Referenz-Strahlern ausgerüstet. Bei jeder Umdrehung werden, in der "Totphase", in der die Spiegel ins Innere des Gehäuses "blicken", die Referenz-Strahler abgetastet und somit jede Scanlinie einzeln kalibriert. Natürlich müssen dabei die Eingangsempfindlichkeit und der erfasste Strahlungsbereich elektronisch konstant gehalten werden. In der Praxis wird meistens ein Strahler soweit erwärmt oder gekühlt bis seine Temperatur über der zu erwartenden Maximaltemperatur des Messobjektes liegt. Der zweite Strahler muss in der Temperatur knapp unter dem zu erwartenden Minimum liegen. Alle sich innerhalb dieser Grenzen befindlichen Objekte werden proportional zu ihrer Strahlung erfasst und registriert. Alle Objekte jenseits dieser Grenzen werden entweder schwarz oder weiss abgebildet. Eine gewisse Kenntnis des Temperaturumfanges im Testgebiet ist daher wichtig. Bei sehr genauen Messungen ist es unerlässlich, die Detektorsignale auf Magnetband aufzuzeichnen. Es empfiehlt sich auch, gleichzeitig die Temperaturen der Referenz-Schwarzkörper laufend zu registrieren. Damit erhält man ein vollständiges quantitatives Messsystem. Die Aufzeichnung auf Magnetband ist der Registrierung auf Film vorzuziehen, da der dynamische Bereich eines Magnetbandes weit über demjenigen eines Filmes liegt. Mit den Daten auf den Bändern kann im Computer direkt gearbeitet werden oder es kann, nach Einfügen von Korrekturen jeglicher Art, wieder ein photographisches Bild erzeugt werden.

Bei den hier verwendeten Scannern wird bei jeder Abtastlinie für die darauffolgende, durch die Begrenzung des Messbereichs auf den tatsächlich vorhandenen Umfang, ein optimales thermales Auflösungsvermögen erreicht. Ob also der totale Strahlungstemperaturumfang nun 2° oder 20° K beträgt, so ist der Scanner jedesmal in der Lage (innerhalb der Rauschgrenzen), den ganzen Bereich seiner Empfindlichkeitsskala maximal auszunützen. Mit anderen Worten: Ein auf Film registrierter Grauton auf einer Scanlinie muss nicht die gleiche Strahlungstemperatur darstellen wie der gleiche Grauton auf der darauffolgenden Abtastlinie. Man nennt dies elektrotechnisch "automatisch kontrollierte Eingangsempfindlichkeit" (engl. "automatic gain control" = "AGC"). Beide Scanner haben zudem wechselstromgekoppelte Detektorschaltungen, d.h. die Detektorsignale werden einem Wechselstromsignal aufmoduliert (engl. "ac coupling"). Dadurch sind beide Geräte nicht geeignet für quantitative flächenmässige Erfassungen. Seit einiger Zeit ist ein Verfahren unter der engl. Bezeichnung "dc restoration" bekannt, bei welchem die Detektorsignale solcher Scanner gleichgerichtet werden. Für die Bereichsfestsetzung dienen feste Vergleichsspannungen und der AGC ist abgeschaltet. Zusätzlich zum Scanner wird dann meist ein senkrecht nach unten gerichtetes Radiometer im gleichen Messbereich wie der Scanner mitgeflogen. So kann man auch mit älteren Geräten quantitative Messungen durchführen. Der Aufwand und insbesondere der elektronische Eingriff ist dabei aber nicht gering, sodass es abzuwägen gilt, ob nicht ein moderner quantitativer Scanner letztlich billiger ist. Eine flächenhafte Erfassung von Strahlungstemperaturen war mit den verwendeten Geräten unmöglich. Es musste darum versucht werden, nicht die Flächen miteinander zu vergleichen, sondern einzelne Scanlinien, die einzeln kalibriert werden konnten, wenn am Boden in der Scanrichtung entsprechende Messungen vorgenommen worden waren. Quantitative Untersuchungen sind aber daher nur beschränkt, bei sehr dichtem Bodenkontrollnetz möglich.

Leider gab es keine Möglichkeit die Detektorsignale direkt auf Magnetband aufzuzeichnen, sodass durch Mikrodensitometer-Profile über die Filmstreifen quantitative Daten ermittelt werden mussten.

2.6. Der Infrarot-Bildflug und die Bildfaktoren

Bei einem Bildflug mit Infrarotscannern sind die folgenden Beziehungen und Werte zu beachten:

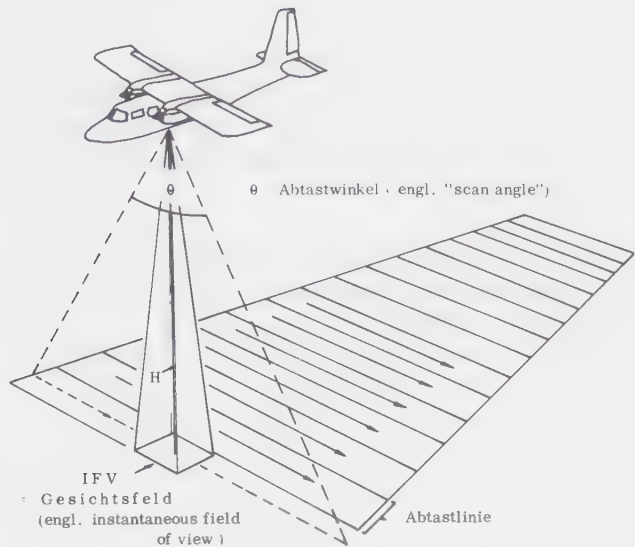


Fig. 5: Infrarot - Bildflug

Der pro Zeiteinheit erfasste Messfleck auf der Erdoberfläche ist gegeben durch die Detektor- und Parabolspiegelwerte und wird im allgemeinen als das Gesichtsfeld des Scanners bezeichnet (engl. "instantaneous field of view = IFV"). Die räumliche Auflösung wird in Milliradian (mrad) angegeben.

Bpl.: Bei einem 4 mrad Scanner beträgt die räumliche Auflösung (engl. "ground resolution") 4 m bei einer Flughöhe von 1000 m/GND, d.h. die Flughöhe muss dem zu erfassenden Objekt und seiner räumlichen Ausdehnung angepasst sein.

Daneben gilt es die thermale Auflösung (engl. "thermal resolution") zu beachten, die in Grad angegeben wird. Eine thermale Auflösung von $\frac{1}{2}^{\circ}$ Celsius bedeutet, dass innerhalb eines Objektes ($e = \text{konstant}$, Bpl. Wasserfläche) sich Temperaturdifferenzen von $\frac{1}{2}^{\circ}$ C erkennen lassen.

Oft verwechselt wird damit die Strahlungs-Auflösung (engl. "radiant resolution"). Diese bezeichnet die kleinste Strahlungstemperaturdifferenz bei der 2 nebeneinanderliegende Objekte ($e \neq \text{konst.}$) unterschieden werden können.

Die Faktoren Fluggeschwindigkeit und Flughöhe, meist unter dem Begriff V/H verwendet, beeinflussen den Vorschub des aufzeichnenden Mediums (Film, Magnetband etc.). Selbstverständlich sind z.B. bei militärischen Geräten durch Flughöhen- und Geschwindigkeitsfestlegungen sowie durch Reaktionszeiten der versch. Detektoren auch die Umdrehgeschwindigkeiten oder die Anzahl der abtastenden Spiegel- und Detektorsysteme gegeben.

Bei zivilen, quantitativen Scannern wird der total abgetastete Winkel (Bildwinkel) mit $50 - 70^{\circ}$ klein gehalten um die Einflüsse des Lamberth'schen und des quadratischen Abstands-Gesetzes nicht gross werden zu lassen.

Bei den hier verwendeten, für andere Zwecke konzipierten Geräten sind diese Winkel je 120° . Dies führt selbstverständlich zu: Erstens ungewollten Randerscheinungen (insbes. wenn das Flugzeug nicht genau um die Längsachse stabil fliegt), und zweitens zu meist kleineren Abbildungsmassstäben, neben den durch die Strahlungsgesetze gegebenen Nachteilen.

Bei Infrarot-Bildflügen ist man versucht, möglichst gute thermale und räumliche Auflösung zu erzielen. Dies ist aber darum nicht möglich, weil ein grossflächiger empfindlicher Detektor ein schlechteres räumliches Auflösungsvermögen besitzt als ein sogenannter kleinflächiger Detektor, der wiederum eine schlechtere thermale Auflösung besitzt. Die Aufgabe selbst muss hier entscheiden, welche Typen einzusetzen sind.

Hat man beispielsweise einen 2 mrad und einen 4 mrad Detektor zur Verfügung, wobei der zweite 4 x empfindlicher ist als der erste, dafür aber eine halb so grosse räumliche Auflösung besitzt, und hat man die Aufgabe, die Temperaturverteilung in einem See festzustellen, so verzichtet man sicher gerne auf eine besonders gute Bodenauflösung zugunsten der besseren thermalen Auflösung.

Umgekehrt liegen die Verhältnisse zum Beispiel bei der Erfassung von Waldbränden, bei denen die genaue Erfassung der Abmessungen des Haupt-Brandes, sowie kleinster Sekundärbrandherde von Wichtigkeit sind.

3. DAS TESTPROGRAMM

Im Rahmen eines grösseren Flugprogrammes des LAD mit Infrarot-Linescannern konnten bei insgesamt 26 Flügen Objekte aufgenommen werden, die nach geographischen Gesichtspunkten ausgewählt worden waren.

In erster Linie wurde versucht, durch die wiederholte Befliegung des Testgebietes "Mauensee" über einen längeren Zeitraum bei Tag und Nacht einen Einblick in die meteorologisch- und tageszeitlich bedingten Schwankungen der Infrarot-Strahlung von landwirtschaftlichen Vegetationsflächen zu gewinnen (behandelt in Kapitel 6).

Daneben sollte ein grösstmögliches Spektrum von geographisch relevanten Anwendungsmöglichkeiten erfasst werden.

Eine Uebersicht über die durchgeführten Flüge und die dabei aufgenommenen Testflächen vermittelt die folgende Tabelle (Tab. 2).

Tab. 2: Uebersicht über das Infrarot-Linescan Flugprogramm

<u>Flug Nr.</u>	<u>Datum</u>	<u>Zeitraum</u> ¹⁾	<u>Testgebiet</u>	<u>Anwendung</u>
1/2/3	17.8.71	FV/SV/FN	a Mauensee	Strahlungsverhalten landwirtschaftlicher Vegetationsflächen
			b Obersee	Einfließen von kaltem Flusswasser in einen See
4/5	18.8.71	SV/FN	a Mauensee	wie 1 a
			b Bodensee	Seeuferüberwachung, Algenbewuchs, thermale Gewässerbelastung
6	19.8.71	FN	a Mauensee	wie 1 a
			b Bielersee	wie 1 b und 2 b
			c Neuenburgersee	wie 1 b und 2 b
			d Les Ponts de Martel	Versuch zur Erfassung von Karstformen im Jura
			e Aarelauf	thermale Belastung eines Flusses durch Abwässer
7	24.8.71	FN	a Mauensee	wie 1 a
			b Aarelauf	wie 6 e
			c Aare/Beznau	wie 6 e, durch Kühlwasser eines thermischen Atomkraftwerkes
			d Zugersee	1 b + 2 b
			e Mauensee	wie 1 a

1) FV = früher Vormittag 08.30 - 10.00
SV = später Vormittag 10.00 - 11.30
FN = früher Nachmittag 14.00 - 15.30
SN = später Nachmittag 16.00 - Sonnenuntergang
NU = nach Sonnenuntergang

<u>Flug Nr.</u>	<u>Datum</u>	<u>Zeitraum</u>	<u>Testgebiet</u>	<u>Anwendung</u>
8/9	25.8.71	SV/FN	a Mauensee b Zugersee c Zug-Baar d Oberaar-Lötschental e Mauensee	wie 1 a wie 1 b + 2 b Stadtgeographie + Industrie morphologische Einheiten im Bereich alpiner Gletscher, Schnee- und Eis- Unterscheidung wie 1 a
10/11	27.8.71	SV/FN	a Mauensee b Bodensee c Obersee d Mauensee	wie 1 a wie 4/5 b wie 1 b wie 1 a
12/13/14	31.8.71	FN/NU/NU	a Obersee b Mauensee c Broye	wie 1 b wie 1 a wie 6 e
15	1.9.71	SV	a Mauensee b Cressier c Lac des Tail- lères d Genfersee	wie 1 a Industrieanlage (Raffinerie) wie 4/5 b wie 1 b (Rhonemündung)
16/17/18	7.9.71	FN/NU/NU	a Mauensee b Oberaar-Lötschental c Genfersee	wie 1 a wie 8/9 d wie 1 b (Rhonemündung)
19	8.9.71	SV	a Mauensee b Cressier c Lac des Tail- lères	wie 1 a wie 15 b wie 4/5 b
20	8.9.71	FN	a Wichtrach b Lac des Tail- lères c Cressier d Mauensee	Archaeologie (röm. Villa) wie 4/5 b wie 15 b wie 1 a
21/22/23	14.9.71	FN/NU/NU	a Mauensee	wie 1 a, mit Bodenfeuchtigkeits- Untersuchung
24	15.9.71	FV	a Oberaar-Lötschental	wie 8/9 d
25/26	16.9.71	SV/FN	a Mauensee b Dischmatal	wie 1 a Geländedarstellung in einem alpinen Tal

Die einzelnen Anwendungen und ihre Interpretationen sind in den Kapiteln 8 und 9 näher beschrieben.

Wie bereits erwähnt, wurden bei jedem Flug simultan 2 Infrarot-Linescanner verwendet. Bei den meisten Flügen stehen somit die Filmstreifen aus den Infrarot-Bereichen 3 - 5 μ und 8 - 14 μ zur Verfügung. Wie Tabelle 2 zeigt, ist die angefallene Datenmenge ausserordentlich

gross. So faszinierend die Bilder auch sind, so musste ich mich in diesem Bericht auf die Auswertung und Präsentation der wichtigsten Daten und Resultate beschränken.

Da die Versuche im Testgebiet Mauensee in einem speziellen Kapitel erläutert werden, sei hier kurz erwähnt, wie die Bodenkontrolle bei den anderen Zielobjekten vorgenommen wurde.

Den Messgruppen, jeweils aus 2 - 4 Mann pro Objekt bestehend, standen Thermometer, Psychrometer, Windmesser sowie elektrische Temperaturtastgeräte zur Verfügung. Mit diesen Geräten wurden einerseits die meteorologischen Elemente vor, während und nach den Ueberflügen, sowie möglichst viele Temperaturen von Objekten gemessen und deren Material- und Oberflächenbeschaffenheit notiert. Aus materiellen Gründen konnten bei den angewandten Versuchen (Ausnahme Mauensee) keine Strahlungsmessungen mit Infrarot-Strahlungsthermometern gemacht werden. Bei zukünftigen Flügen ist dies unbedingt zu empfehlen. Dabei ist wichtig, dass die Mess-Bereiche der Infrarot-Messgeräte mit denen der Linescanner übereinstimmen, damit die Daten später quantitativ verwertet werden können.

4. DAS TESTGEBIET MAUENSEE

4.1 Lage

Wenige Kilometer westlich des Städtchens Sursee und dem Sempachersee liegt der Mauensee. Etwas weiter westlich davon finden wir in einem ehemaligen Moorgelände im sog. "Chalpechermoos" das Testgelände (s. Fig. 6 mit den eingezeichneten Mess-Stationen). Es liegt in einer breiten fruchtbaren Ebene neben dem durch urgeschichtliche Ausgrabungen bekannten Wauwilermoos.

Die ganze Ebene wird landwirtschaftlich intensiv genutzt. Die Wahl des Testgebietes hat mehrere Gründe:

1. Das Gelände ist flach, darum sind neben den, durch die Abtasttechnik auftretenden Verzerrungen, keine weiteren durch das Terrain bedingten Korrekturen zu berücksichtigen.
2. Die Lage, Grösse und Vielfalt der landwirtschaftlichen Kulturen war ideal, obwohl der Zeitpunkt der Versuche für Aufnahmen von Getreidefeldern zu spät angelegt war.
3. Das Gebiet ist durch 2 Hauptachsen (s. Fig. 6) gut erschlossen und für Bodenkontrollmessungen leicht zugänglich.
4. Fliegerisch bietet es keine Schwierigkeiten. Genug markante Geländepunkte ermöglichten exakte wiederholte Ueberfliegungen auch ohne komplizierte Navigationssysteme. Eine Radarüberwachung von einem nahen Flugplatze war möglich – was vor allem für die Nachtflüge wichtig war.



Fig. 6: Lage des Testgebietes "Mauensee" und Position der meteorologischen Messstationen(*). Ausschnitt aus der Landeskarte 1:50'000, Blatt 234 "Willisau" reproduziert mit Bewilligung der Eidg. Landestopographie vom 15.10.1973.

4.2. Instrumentelle Ausrüstung für die Bodenmessungen

Folgende Instrumente standen für die meteorologischen Datenerhebungen und die simultan zu den Ueberflügen durchgeführten Infrarot-Strahlungsmessungen zur Verfügung:

- ein PRT-10 Präzisions Strahlungs-Thermometer von "Barnes". Es ist im Bereich $6.5 - 20 \mu$ empfindlich, sodass die Bandbreite grösser ist als diejenige des Hawker Siddeley Scanners. Beim PRT-10 handelt es sich um ein ungekühltes Strahlungspyrometer, dessen empfindlicher Teil aus einem thermischen Detektor besteht. Der Messbereich geht von -10° bis $+60^{\circ} \text{C}$. Diese Grad Celsius bezeichnen die äquivalente Schwarzkörpertemperatur des gemessenen Objektes. Die Ablesegenauigkeit liegt bei $1/2^{\circ} \text{C}$ bei der absoluten Messtechnik. Bei einer ebenfalls möglichen differenziellen Messmethode ist die Genauigkeit im Bereich $20-30^{\circ}$ mit 0.2°C angegeben. Zur Kalibrierung im Feld dient ein kleiner Metall-Referenz-Schwarzkörper mit eingebautem Thermometer. Nachteilig zeigte sich bei der Bedienung lediglich, dass die Kalibrier-Einstellknöpfe zu leicht versehentlich verstellt werden können. Die grösste Schwierigkeit liegt aber doch im Vergleich der Messdaten mit den vom Flugzeug aus gemachten Messungen mit dem Scanner, da die Bereiche nicht genau gleich gross sind. Im Kapitel 6 wird gezeigt, wie dieses Problem schliesslich gelöst werden konnte.
- Ein ARDONOX - Infrarot Strahlungsthermometer von "Siemens" im Bereich von $3.8 - 8 \mu$. Das Strahlungs-Pyrometer mit einer 19-fach Thermokette als Detektorelement stand leider erst für die letzten Versuche zur Verfügung. Eine Eichmöglichkeit ist bei diesem Gerät nicht vorgesehen, sodass es nur zu Relativmessungen gebraucht werden konnte. Konzipiert als mehr oder minder ortsfestes Instrument, war es nicht besonders handlich (Messkopf + Voltmeter + Lichtverstärker mit Elektronikteil + Stromversorgung) und musste mit 220 Volt Wechselstrom gespiesen werden. Deshalb konnten innerhalb eines begrenzten Zeitraumes beim Ueberflug nur wenige Felder gemessen werden. Die relative Messgenauigkeit litt dabei unter Speisespannungsschwankungen des Aggregats, Veränderungen am Lichtverstärker etc.
- drei Wind-Schreiber System "Woelfle" der Firma Lambrecht. Mit ihnen wurden Windgeschwindigkeit und Richtung kontinuierlich über 6 Wochen registriert. Die Messhöhe des Schalenkreuzes betrug 3 m. Je 1 Gerät war bei Messstelle A und B aufgestellt, während das dritte als Ersatz und für Spezialmessungen zur Verfügung stand (s. Fig. 7).
- zwei meteorologische Wetterstationen zur Messung von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit (je bei Messstelle A und B), die ebenfalls 6 Wochen (1 Woche vor, 4 Wochen während und 1 Woche nach dem Flugprogramm) in Betrieb waren (s. Fig. 7).
- verschiedene elektrische Thermistor-Temperaturtastgeräte, konventionelle Thermometer und Psychrometer zur Eichung der Schreiber und Geräte.



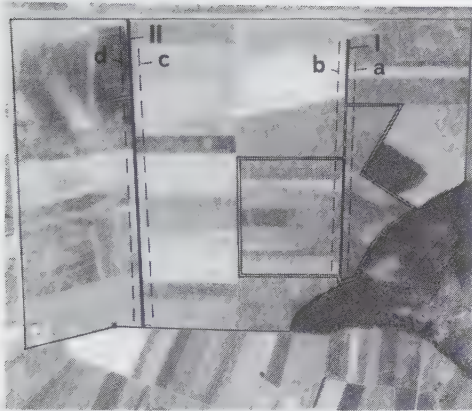
Fig. 7: Die Meteo-Messstation im Testgebiet "Mauensee" mit Thermo - Hygrograph und Windschreiber.

4.3. Anbauverhältnisse im Untersuchungsgebiet

Mit den Testflügen wurde am 17. August 1971 begonnen, d.h. die Getreideernte war bereits abgeschlossen. Darum konnten nur noch folgende Kulturen untersucht werden:

- Fettwiesen (gedüngte Wiesen)
- Rüben
- Kartoffeln
- Mais
- + verschiedene Stoppelfelder (ehem. Weizen/Hafer/Gerste), die im Verlauf des Testprogrammes wieder zu Fettwiesen zuwuchsen.

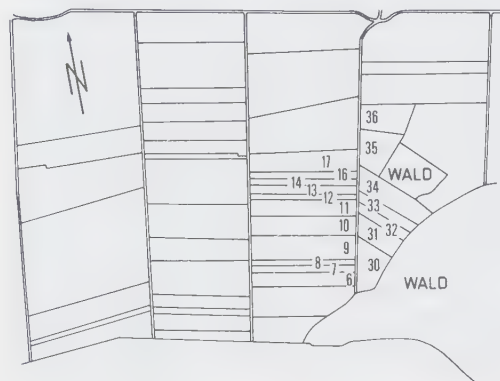
Fig. 8a:



Panchromatische Luftaufnahme des Testgebietes "Mauensee" vom Mai '71.

Haupttestgebiet = doppelt umrandet
allg. Testgebiet = einfach umrandet
I = Hauptachse
II = Nebenachse
a, b, c, d = Messachsen

Fig. 8b:



Landwirtschaftliche Gliederung und Nutzung im Testgebiet.

6, 9, 11, 12, 17, 35, 36 Fettwiesen
7, 30, 34 Fettw. (ehem. Gerste, Weizen, Hafer)
8, 13, 31 Rüben
14, 16, 32, 33 Kartoffeln

Das Hauptgebiet ist in Fig. 8 a doppelt umrandet. Bei jedem Ueberflug wurden der Hauptachse entlang links und rechts die Strahlungstemperaturen der Felder mit dem PRT-10 gemessen. Die Messhöhe betrug dabei ca. 1 m über der Vegetationsoberfläche. Das dabei integrierte Messfeld war damit ungefähr gleich gross, wie das Gesichtsfeld (IFV) des Scanners.

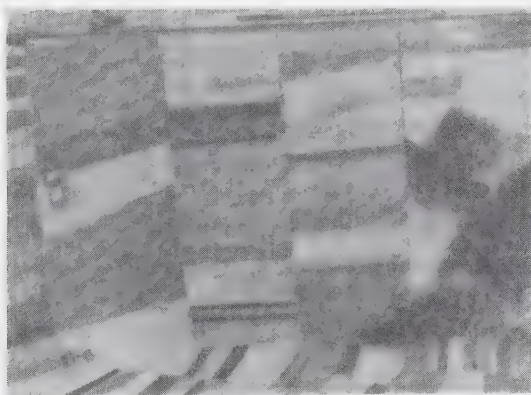
Die 2. Achse mit dem sekundären erweiterten Testgebiet sollte zum Verifizieren der Resultate dienen. Da aber die Strahlungsmessungen immer erst ca. 1/2 Stunde nach dem Ueberflug erfolgen konnten, wurden diese Daten nur in wenigen Fällen weiterverwendet.

Selbstverständlich können diese Punktmessungen nicht als statistisch repräsentativ für die jeweilige Feldfläche gelten. Auch die Elektronik des Scanners verunmöglicht wie ausgeführt eine quantitativ einwandfreie flächenhafte Erfassung des Testgeländes. Darum wurde die Flugrichtung so gewählt, dass die Messpunkte des PRT-10 jeweils bei den Scanlinien a, b, c und d

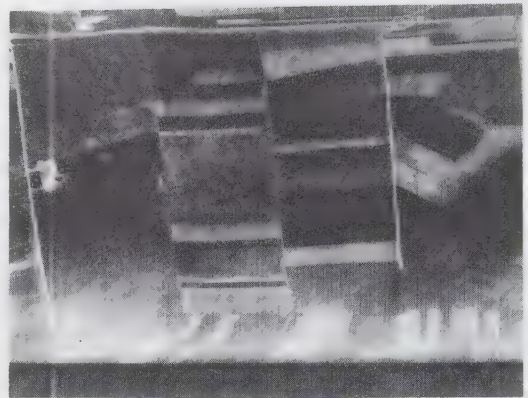
(Fig. 8a) lagen. Die PRT-10 Messungen konnten am schnellsten und einfachsten links und rechts der Hauptachsen durchgeführt werden, sodass die Flugrichtung im rechten Winkel zu den Achsen liegen musste. Dank dieser Anordnung gelang später die relative Kalibrierung der einzelnen Scanlinien. Der Scanner wurde also gewissermaßen als Querprofil-Radiometer benutzt. In Kapitel 6 werden die quantitativen Ermittlungen dargestellt.

4.4. Bildbeispiele von Thermographien bei Tag und Nacht

Fig. 9 zeigt die Abbildungsverhältnisse bei einem Nachmittagsflug bei unbedecktem Himmel. Es muss hier nochmals darauf hingewiesen werden, dass bei Tagaufnahmen nur im Bereich $8 - 14 \mu$ von thermalen Bildern die Rede sein kann, während im $3 - 5 \mu$ Bereich bei Tag nicht nur die Infrarot-Emission eine Rolle spielt, sondern auch die direkte Reflexion von Sonnenstrahlung. Eine einfache Trennung ist bei Sonneneinstrahlung nicht möglich. Bei Nacht allerdings hat man es auch im Bereich von $3 - 5 \mu$ mit reiner Emission von Strahlung zu tun.



$3-5 \mu$



$8-14 \mu$

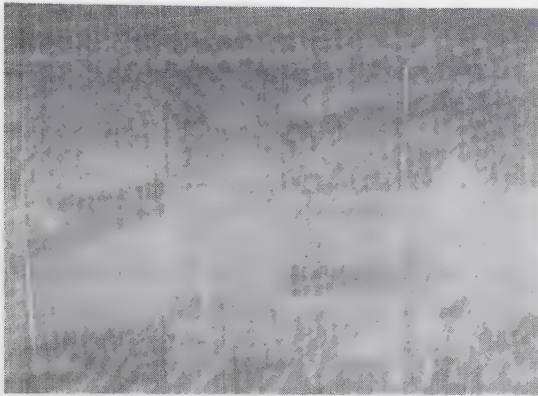
Fig. 9: Beispiele von Thermographien bei Tag, Testgebiet "Mauensee", Flug Nr.12 vom 31.8.71, Zeit 14.46 , Anbaukartierung s. Fig. 8b.

Allgemein fällt auf, dass das $3 - 5 \mu$ Bild einer panchromatischen Aufnahme sehr ähnlich sieht, wogegen das $8 - 14 \mu$ Bild beinahe wie ein Negativ davon wirkt. Im Bereich $3 - 5 \mu$ lassen sich Laubwald (hell) und Nadelwald (dunkel) sehr gut unterscheiden, während diese Diskriminierung im Bereich $8 - 14 \mu$ nicht möglich ist. Der schwarze Asphalt reflektiert bei $3 - 5 \mu$ relativ wenig Strahlung. Bei $8 - 14 \mu$ ist er gegenüber seiner Umgebung hell abgebildet (wärmer). Hochstehende Fettwiesen reflektieren stark im $3 - 5 \mu$ Bereich, sind aber bei $8 - 14 \mu$ dank der grösseren Oberfläche kühl (Bpl. Fettwiese 35). Bei frisch gemähten Wiesen sind die Verhältnisse umgekehrt (Bpl. Fettwiese 36). Die Reflexion im $3 - 5 \mu$ Bereich ist reduziert, dagegen steigt bei $8 - 14 \mu$ die Oberflächentemperatur an. Auch beim Mais und den Rüben kann eine ähnliche Negativ-Positiv Abbildung in den beiden Bereichen festgestellt werden. Die Kartoffeln selbst unterscheiden sich durch die verschiedenen Anbauarten und Erntegrade. Bei Kartoffeln 16 sind die oberen Pflanzenteile bereits verdorrt, und der relativ dunkle ehemalige Moorboden reflektiert bei $3 - 5 \mu$ kaum. Hingegen heizt sich der Boden bei Sonneneinstrahlung sehr stark auf, was zu den hellen Grautönen im $8 - 14 \mu$ Bild führt. Die anderen Kartoffeln verhalten sich je nach Wuchsdichte und Vegetationszustand der oberen Pflanzenteile verschieden.

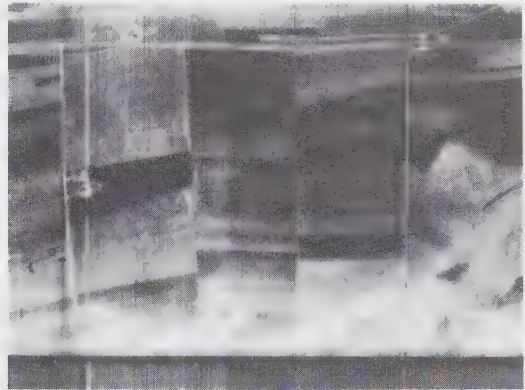
Dieser einfache Vergleich lässt schon ein Resultat vorausahnen, dass Ernte- und Reifegrade bei den Strahlungstemperaturen der Kulturen wichtige Parameter darstellen.

Streng genommen ist die Aussage, dieses Objekt sei "wärmer" oder "kälter" als ein anderes nicht richtig, spielt doch der Emissionsfaktor noch eine wichtige Rolle ($W = \sigma \cdot \epsilon \cdot T^4$). Verfeinert ausgedrückt bedeutet also, dass von den im Positiv (Fig.9) helleren Flächen mehr Infrarot-Strahlung in dem erwähnten beschränkten Wellenlängenbereich ausgeht, als von den dunkleren Flächen. Eine Aussage über die Temperatur ist also nur dann zulässig, wenn der Emissionsfaktor konstant ist (z.B. bei Wassermassen verschiedener Temperatur).

In Fig. 10 sind die Abbildungs-Verhältnisse in einer wolkenlosen Nacht dargestellt.



3-5 μ



8-14 μ

Fig. 10: Beispiele von Thermographien bei Nacht, Testgebiet "Mauensee", Flug Nr.13 vom 31.8.71, Zeit 20.13 .

Bei der 3 - 5 μ Thermographie fällt sofort die Kontrastlosigkeit trotz automatisch gesteuerter Eingangsempfindlichkeit (AGC) auf. Ganz offensichtlich arbeitet dieser Scanner bei den im Testgebiet herrschenden Strahlungs-Temperaturen um 7°C nicht in seinem optimalen Bereich (s. Kapitel 7). In beiden Spektralbändern handelt es sich um die Abbildung thermaler Effekte, darum sind die grundlegenden Aussagen bei beiden Bildern gleich. Nur, dass der Kontrastumfang beim 8 - 14 μ Bereich erhalten geblieben und eine Interpretation darum hier viel einfacher ist.

Allgemein wirkt der Wald in dieser kühlen Nacht mit ungehinderter Abstrahlung als Wärmespeicher. Auch der Asphalt ist dank seiner grossen Wärme-Speicherkapazität noch warm. Gemähte Wiesen und die "Kartoffeln 16", bei denen bei beiden der Erdboden den Hauptanteil der emittierten Strahlung ausmacht, erscheinen relativ warm. Beim Mais gilt ähnliches wie für den Wald. Die Strahlungstemperatur der Rüben ist gering, da sie tagsüber wenig Wärme aufgenommen und gespeichert haben.

Tab. 3 Vergleich der Tag- und Nachtaufnahmen des Testgebietes Mauensee

<u>Oberflächentyp</u>	<u>3 - 5 μ</u>		<u>8 - 14 μ</u>	
	<u>Tag</u>	<u>Nacht</u>	<u>Tag</u>	<u>Nacht</u>
<u>Wald:</u> Laubwald	hell ¹⁾	dunkel ¹⁾	hell	dunkel
Nadelwald	dunkel	hell	dunkel	hell
<u>Asphalt:</u>	dunkel	hell	hell	hell
<u>Fettwiesen:</u> hochstehend	hell	dunkel	dunkel	dunkel
gemäht	dunkel	hell	hell	hell
<u>Kartoffeln:</u> erntereif	dunkel	hell	hell	hell
wachsend	hell	dunkel	dunkel	dunkel
<u>Rüben:</u>	hell	dunkel	dunkel	dunkel
<u>Mais:</u>	dunkel	hell	dunkel	hell

Durch diese groben relativen "Signaturen" der einzelnen Oberflächentypen, lassen sich 4 Gruppen mit ähnlichem Strahlungsverhalten unterscheiden: (h = hell, d = dunkel)

<u>Signatur</u>	<u>zugehörige Oberflächentypen</u>
hd hd ²⁾	Laubwald
dh dh	Nadelwald, Mais
dh dd	Kartoffeln im Wachstum, hochstehende Fettwiesen, Rüben
dh hh	Asphalt, reife Kartoffeln, gemähte Fettwiesen

Die Oberflächentypen der einzelnen Gruppen lassen sich gegenüber denjenigen der anderen Gruppen nach diesem einfachen Schema unterscheiden. Eine quantitative Untersuchung in Kap. 6 wird zeigen, ob eine weitergehende Trennung aufgrund von meteorologischen Strahlungstemperatur-Parametern möglich ist.

1) dunkel und hell sind relative Werte, die sich allein auf die Abbildungen des betreffenden Objektes beziehen.

2) hd hd, bedeutet: 3 - 5 μ : Tag: hell, Nacht: dunkel, 8 - 14 μ : Tag: hell, Nacht: dunkel

4.5. Uebersicht über die Hauptversuche im Testgebiet Mauensee (Daten und Uebersicht über die Flüge s. Tab. 2)

Es folgt hier eine Zusammenstellung der Themen, die in den folgenden Kapiteln am Beispiel Testgebiet "Mauensee" behandelt werden.

Flugplanung und bei der Auswertung zu berücksichtigende Faktoren

1. Flugplanung

- Einfluss des Sonnenstandes auf die zu wählende Flugrichtung
- Einfluss des Testobjektes auf die Flugrichtung (insbes. bei AC/AGC-Scannern)

2. Auswertung

- Einfluss des Messwinkels und der Flugrichtung (Bodentests + Flugversuche)
- Einflüsse von scannerseitigen Fehlern und deren Korrekturmöglichkeiten
- spezielle Einflüsse (Regen, Wolkenschatten)

Versuch zur Erfassung der Zusammenhänge zwischen meteorologischen Faktoren und thermaler Infrarot Emission im 8 - 14 μ Bereich.

1. Sind die Bodenmessungen mit dem PRT-10 sinnvoll und brauchbar ?
2. Sind die Bodenmessungen mit dem PRT-10 repräsentativ für die 8 - 14 μ Scanner-Strahlungsdaten ?
3. Kalibrieren der 8 - 14 μ Daten mit den PRT-10 Fettwiesen-Bodenmessungen.
4. Zusammenhang zwischen meteorologischen Faktoren und der thermalen Infrarot-Emission im Bereich 8 - 14 μ .

Versuche zur Anwendung der Infrarot-Technik im Testfalle Mauensee

1. Versuch einer Kulturentrennung mit Hilfe einer multiplen schrittweisen linearen Regression von Meteodaten und 8 - 14 μ Strahlungs-Temperaturen und 3 - 5 μ Messwerten.
2. Versuch zur Bestimmung der Bodenfeuchtigkeit einiger Testfelder.

4.6. Bei der Auswertung verwendete Instrumente und Methoden

- Joyce Loebel Profil Mikrodensitometer:

Mit diesem Gerät konnten sehr exakte Dichteprofile quer über die Infrarot-Filmstreifen gemessen werden. Im Normalfalle wurden die Profile in Scanlinienrichtung integrierend über ca. 5 Abtastlinien aufgenommen. (Bpl. s. Fig. 11).

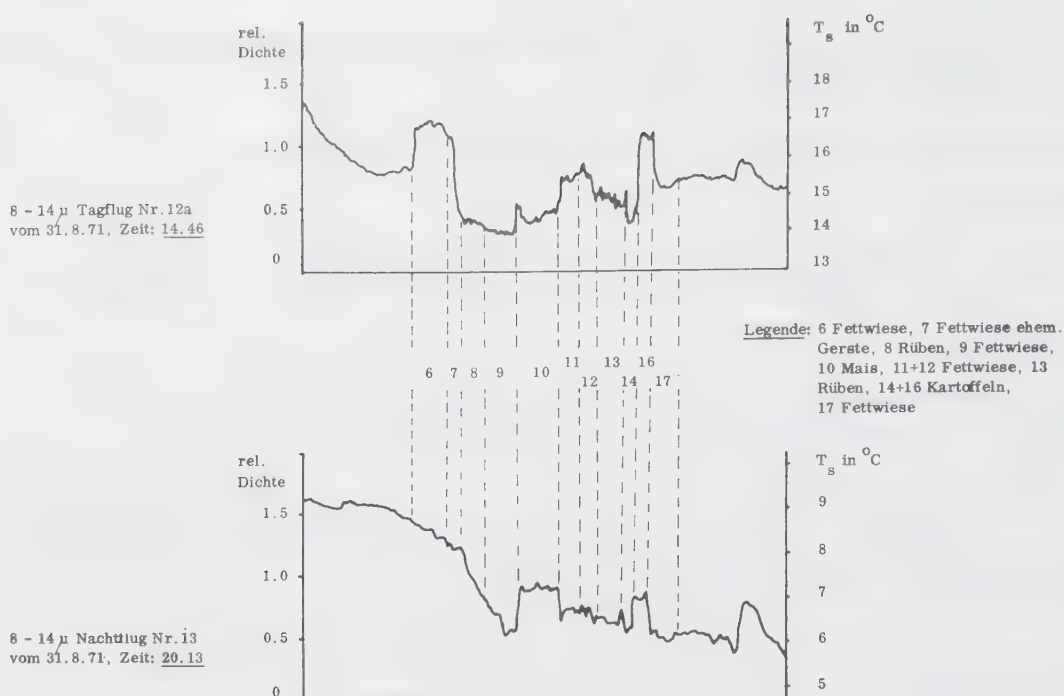


Fig. 11: Vergleich von Mikrodensitometer-Profilen über die Messachse "Mauensee - b" zwischen einer Tag- und einer Nachtaufnahme im Bereich 8 - 14 μ .

Die Dichte auf den Infrarot-Filmen ist linear proportional zur empfangenen Infrarot-Strahlung. Die Densitometerprofile an den Messlinien a, b, c und d konnten einzeln interpretiert, mit den Bodendaten verglichen und schliesslich mit den Infrarot-Strahlungswerten der Fettwiesen relativ kalibriert werden. Erst durch diese Kalibrierung war es möglich, die Profildaten verschiedener Flüge miteinander zu vergleichen.

- Quantimet QTM 720:

Er diente zur Untersuchung flächenhafter Verteilung der Infrarot-Strahlung. Für kleine Flächen wurde mit der Annahme einer konstanten Eingangsempfindlichkeit operiert. Dabei konnte untersucht werden, wieweit die Punktvergleichsmessungen am Boden Gültigkeit für das ganze Feld besitzen. Ideal könnte dieses Gerät bei einem quantitativen, kalibrierten Scanner eingesetzt werden, da auf dem Monitor direkt die Anteile und die Verteilung verschiedener Strahlungsintensitäten ermittelt werden können.

- Mit dem IBM Computer 370-155 des Rechenzentrums der Universität Zürich wurden die multiplen schrittweisen Regressionen berechnet, für die Erfassung des Zusammenhangs von meteorologischen Daten mit der emittierten Infrarot-Strahlung.
- Ein Diehl Combitron S Kleincomputer diente zur Berechnung einfacher linearer Regressionen.

5. FLUGPLANUNG UND BEI DER AUSWERTUNG ZU BERUECKSICHTIGENDE FAKTOREN

5.1. Flugplanung

5.1.1. Einfluss des Sonnenstandes auf die zu wählende Flugrichtung

Vermehrt noch wie bei normalen Flugaufnahmen möchte man bei Thermographien unerwünschte Reflexionen in den Bildern vermeiden. Im Bereich $3 - 5 \mu$ treten diese sehr oft in Erscheinung, fällt doch auch ein Teil reflektierter Sonnenstrahlung in diese Spektralzone (Bpl. s. Fig. 12 a).

Umso erstaunlicher ist aber der Reflexionseffekt im Bereich $8 - 14 \mu$. Gerade bei spiegelnden, stark reflektierenden Wasserflächen kann es doch vorkommen, dass thermale Gegebenheiten total überdeckt werden. Fig. 12 b zeigt ein solches Beispiel.

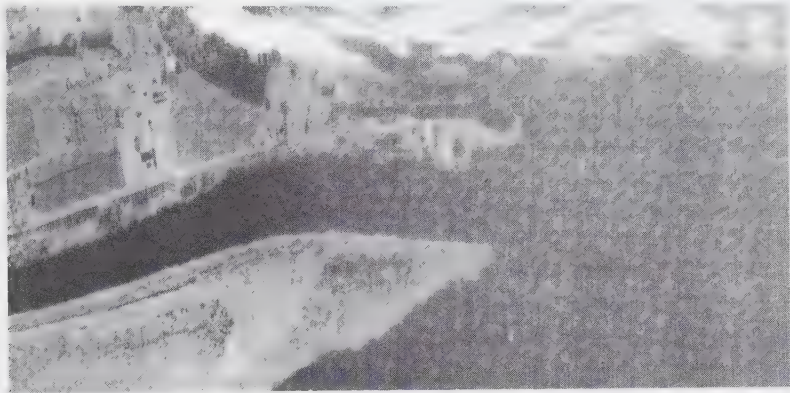


Fig. 12a: $3-5 \mu$

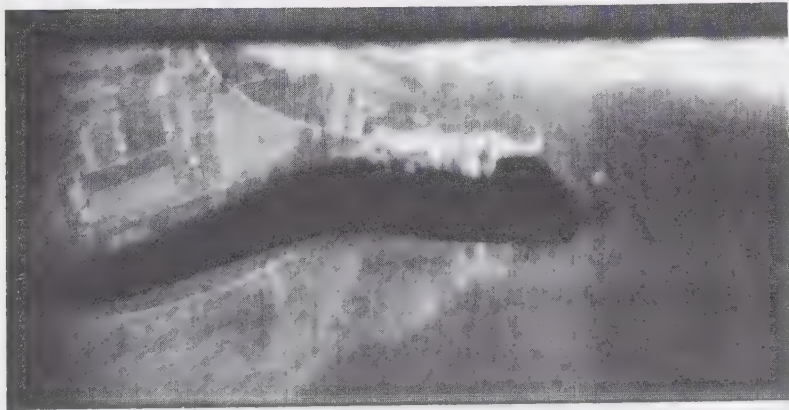


Fig. 12b: $8-14 \mu$

Reflexion von Sonnenstrahlung (helle Flächen am oberen Bildrand) in den Bereichen $3-5$ und $8-14 \mu$ am Bildbeispiel der Rhonemündung (Orientierung SW = oben), Flug Nr. 16 vom 7.9.71, Zeit 15.05.

Diese speziellen, besonders bei Aufnahmen über Wasser auftretenden Erscheinungen können jedoch durch geeignete Flugachsen- oder Flugzeit-Planung vermieden werden. In diese Ueberlegungen muss selbstverständlich auch der Bild- resp. Abtastwinkel miteinbezogen werden.

Die Flugachse sollte wenn immer möglich nicht rechtwinklig zum Sonnenazimuth verlaufen. Eine Zeitplanung ist also erforderlich. Lassen sich Flugachse und Zeitpunkt der Aufnahmen nicht verändern, so kann durch Verschieben und seitliches Ueberlappen von Flugachsen dem Reflexionseinfluss ausgewichen werden.

Wie sich die Reflexionen über Vegetationsflächen auswirken wurde am Beispiel Testgebiet Mauensee untersucht und in Kapitel 5.2.1. dargestellt.

5.1.2. Der Einfluss des Testobjektes auf die Flugrichtung

Hier soll insbesondere für unkalibrierte Scanner mit AGC gezeigt werden, wie die Umschalt-effekte durch geänderte Eingangsempfindlichkeit und Auflösung etwas vermindert werden können.

Nimmt man beispielsweise den Fall an, in dem das Einfließverhalten eines Flusses in einen See untersucht werden soll, so wird man normalerweise die Flugrichtung parallel zum Seeufer über die Flussmündung hinweg führen. Dies bewirkt jedoch beim Scanner, dass er, sobald er die erste in der Temperatur unterschiedliche Wassermasse trifft, sofort durch das AGC die Empfindlichkeit umschaltet. Dadurch geht Detail verloren. Ein weiterer Nachteil dieser Methode liegt darin, dass durch das seitliche Erfassen eines Landstreifens beim Seeufer-parallelen Flug, der Strahlungstemperaturbereich zwischen Land und Wasser für den Scanner meist gross und darum die thermale Auflösung im Wasserbereich des Bildes nicht mehr optimal ist (Bpl. Fig. 57).

Legt man die Flugrichtung längs dem Fluss, über die Mündung und in den See hinaus, so ist zwar im Landbereich die Temperaturauflösung im Flusse klein, sobald aber das Flugzeug über die Mündung hinweg ist, kann im Wasser mit bester Auflösung gerechnet werden (Bpl. Fig. 58).

So sollte man für jedes Testobjekt und die gewünschte Auswertegenauigkeit die Fluglinien überprüfen. Beim Testgebiet Mauensee wurden sie beispielsweise durch die Zugänglichkeit für möglichst simultane Bodenmessungen, die für die quantitativen Ermittlungen unerlässlich waren, bestimmt.

5.2. Auswertung

5.2.1. Der Einfluss des Messwinkels zur Flugrichtung inbezug auf die Sonne

5.2.1.1. Bodenversuche

Mit den Infrarot-Strahlungsthermometern Ardonox und PRT-10 wurden Winkelmessversuche durchgeführt, die zeigen sollten, inwieweit die Strahlungstemperaturwerte bei bestimmten Flugrichtungen inbezug auf die Sonne korrigiert werden müssen. Fig. 13 zeigt die Testanordnung, bei der die geometrischen Messvoraussetzungen ähnlich denjenigen der Flugzeug-scanner gehalten werden.



Fig. 13: Testanordnung für die Winkel-
messversuche (PRT-10 vorne,
Ardonox hinten).

Die folgenden Figuren zeigen an 3 Beispielen den Einfluss der Messwinkel in beiden Bereichen bei Untersuchungen von:

- Fettwiese (hochstehend)
- Fettwiese (gemäht)
- Asphalt

5.2.1.2. Interpretation der Messergebnisse der Versuche an den Fettwiesen (Fig. 14 - 21)

- Drehachse horizontal und im rechten Winkel zur Sonne (Messungen in Richtung Sonne, Fig. 14 - 17)

Bei Fig. 14 mit Messrichtung zur Sonne hin, zeigt sich im Bereich $3.8 - 8 \mu$ bei hochstehender Fettwiese ein starkes Ansteigen der Werte, was mit der direkten gerichteten Reflexion zusammenhängen muss. Das leichte Ansteigen beim Vergrössern des Winkels von der Sonne weg wird durch die der Sonne zugerichtete Blattstellung erzeugt, die sich ebenfalls in erhöhter Reflexion ausdrückt. Fig. 16 mit gleicher Messanordnung über der gemähten Fettwiese zeigt ein sehr ähnliches Verhalten mit etwas verstärktem Effekt (Reflexion an den Stoppeln).

Im Bereich $6.5 - 20 \mu$ (Fig. 15) ist nur ein leichtes Ansteigen der Strahlungstemperatur bei vergrössertem Winkel von der Sonne weg zu beobachten. Auch hier kann die Geometrie der Blattstellungen dafür verantwortlich gemacht werden. Während man im Messbereich zur Sonne hin die kühleren Schattenseiten der Blätter abtastet, so sieht man in der sonnenexponierten Richtung die erwärmten Blattoberseiten. Bei der gemähten Fettwiese (Fig. 17) fehlt dieser Effekt weitgehend.

- Drehachse horizontal, zur Sonne gerichtet (Fig. 18 - 21)

Im Bereich $3.8 - 8 \mu$ zeigt sich in beiden Abtastrichtungen bei der hochstehenden Fettwiese ein leichtes Ansteigen der Messwerte, das offensichtlich ebenfalls auf die erhöhte Reflexion der Blätter zurückzuführen ist (Fig. 18). Der Effekt bei den gemähten Fettwiesen ist ähnlich (Fig. 20). Während man in der Senkrechtmessung oft den dunkleren, wenig reflektierenden Boden misst, sind es im angewinkelten Falle die oberen Pflanzenteile.

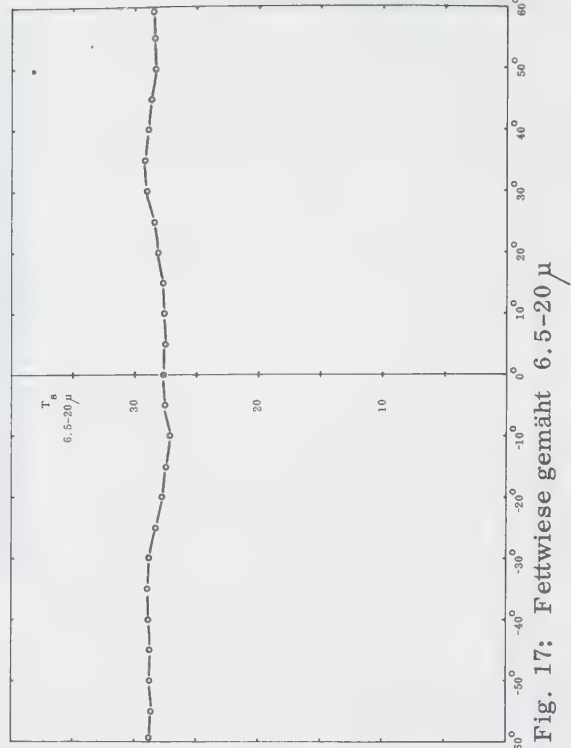
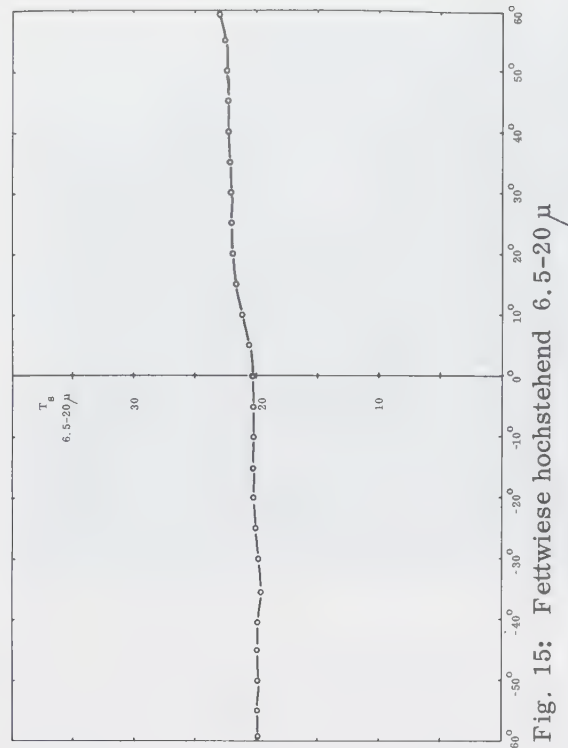
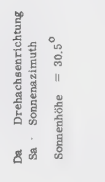
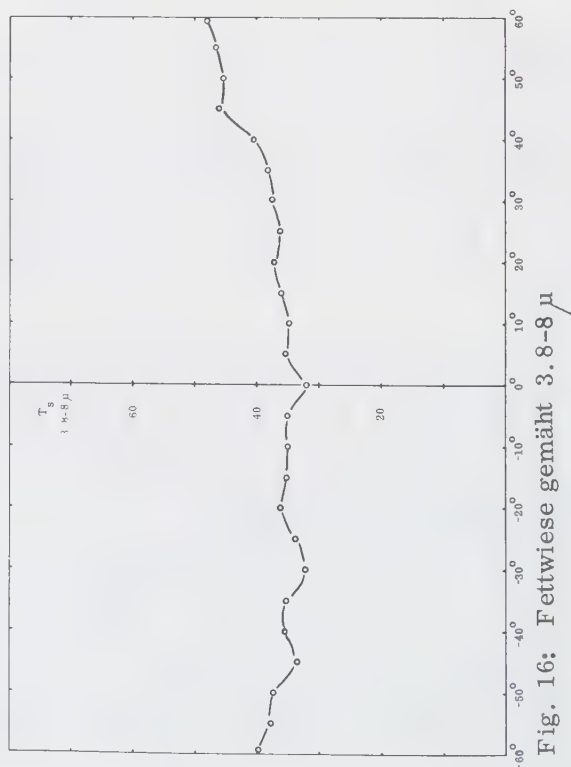
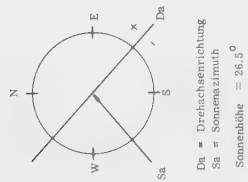
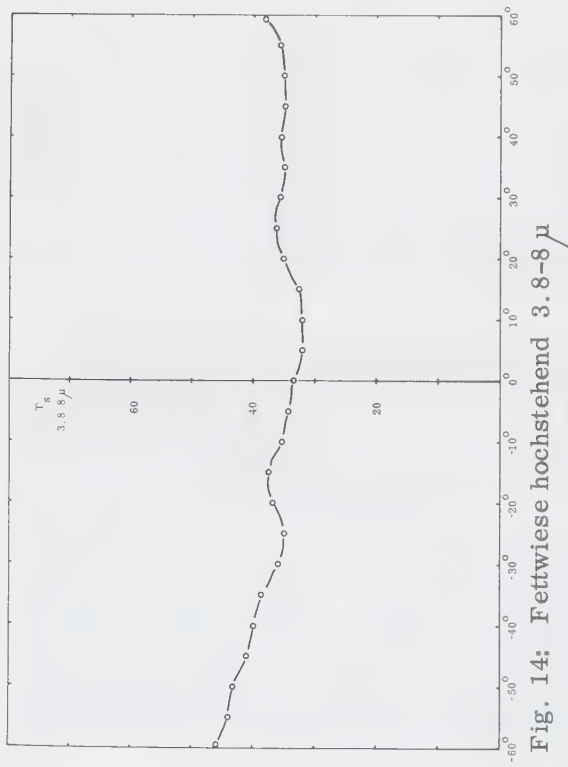


Fig. 14-16: Winkelabhängigkeit der Messungen an Fettwiesen (Bodenvers.), Drehachsen horizontal, rechtwinklig zum Sonnenazimuth.

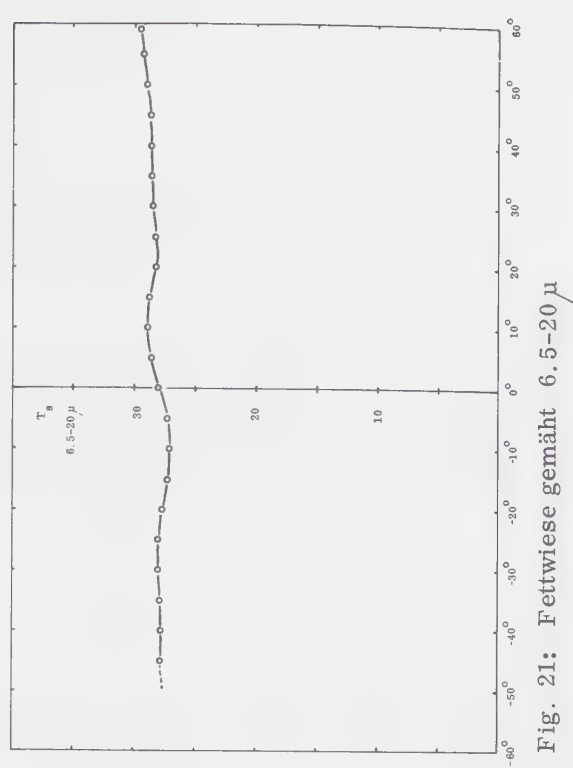
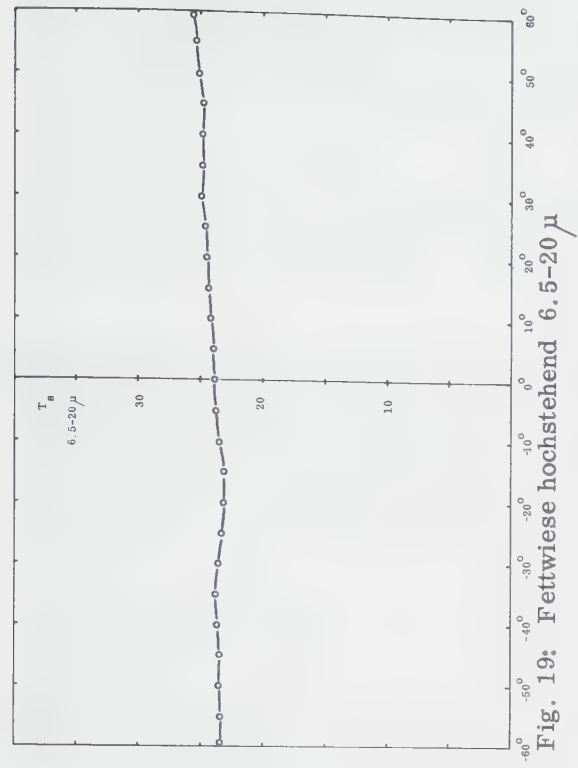
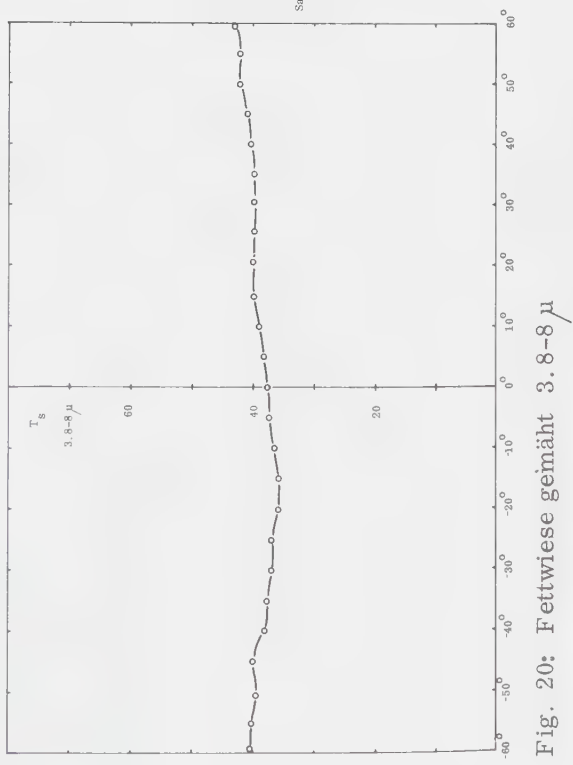
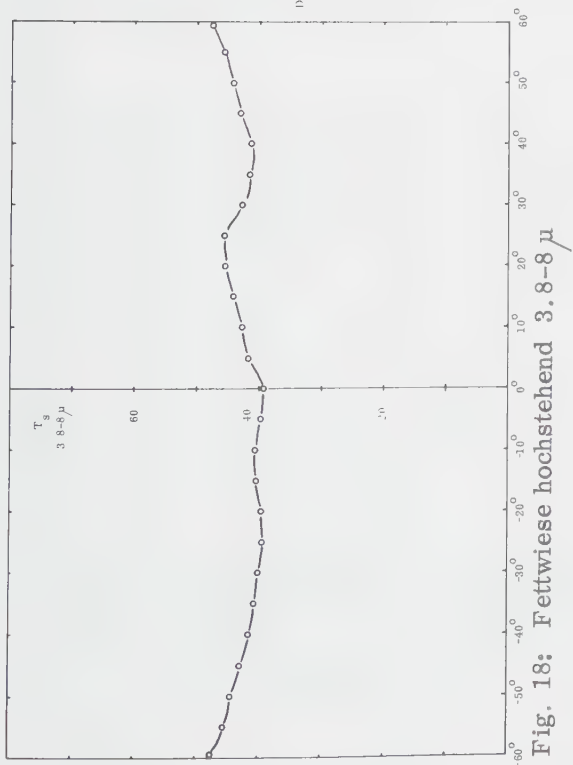


Fig. 18-21: Winkelabhängigkeit der Messungen an Fettwiesen (Bodenvers.), Drehachse horizontal $\pm$ parallel zum Sonnenazimuth

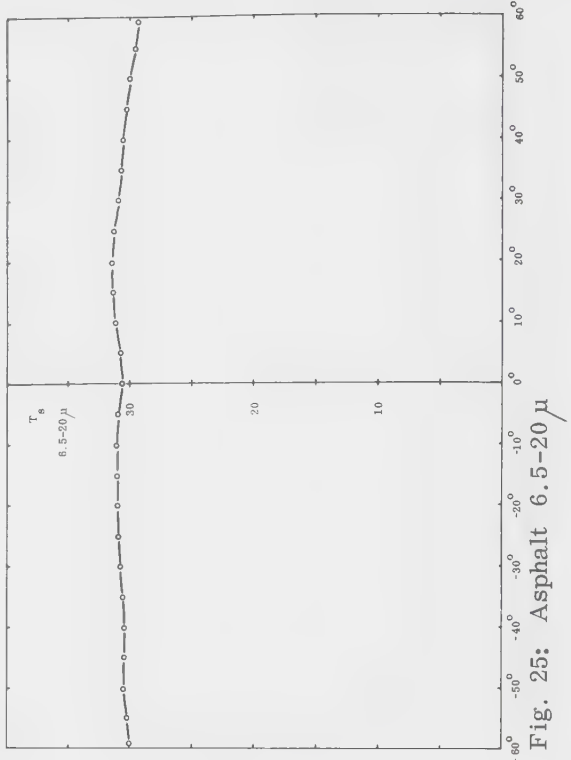
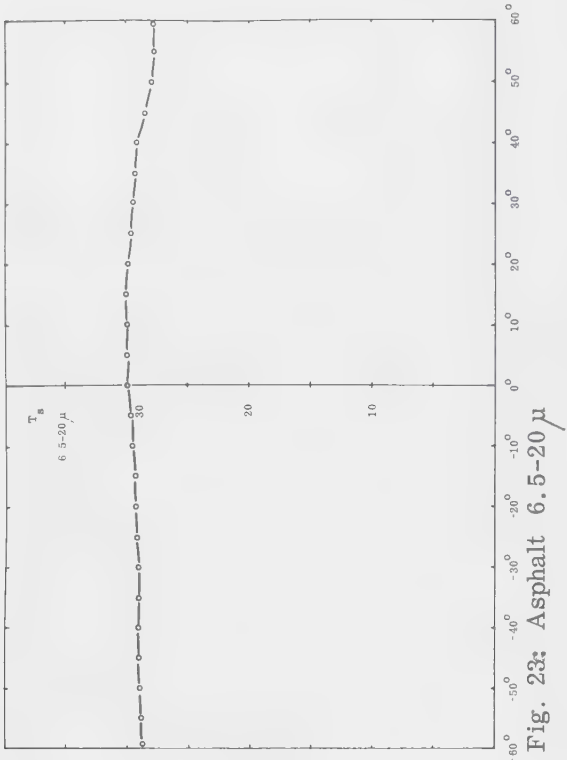
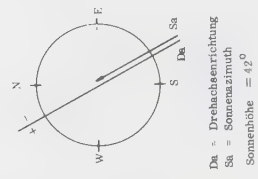
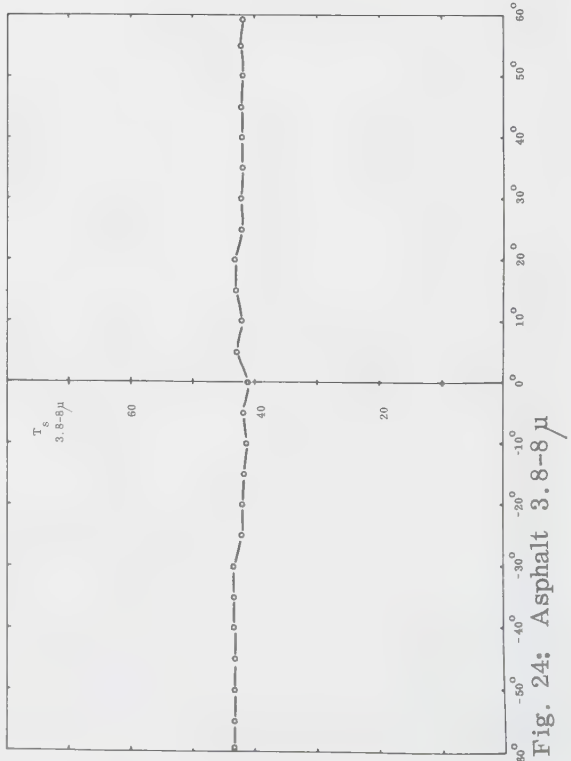
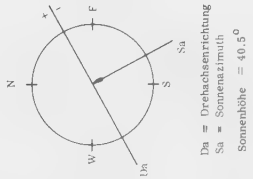
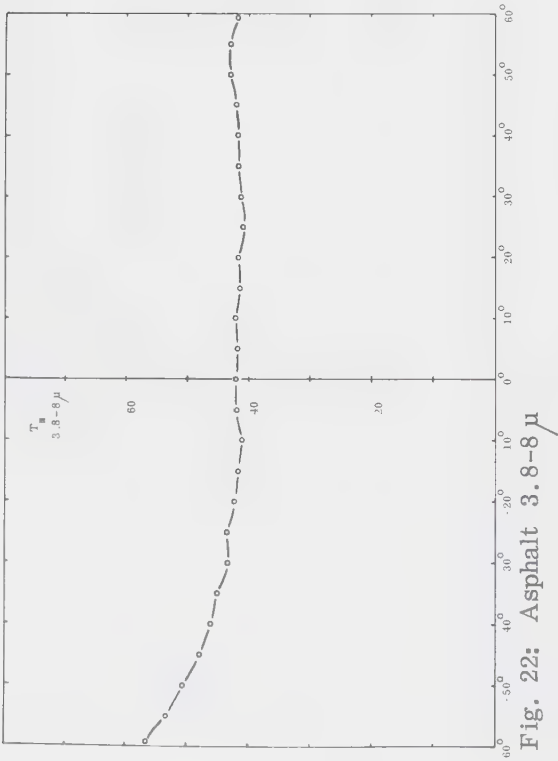


Fig. 22-25: Winkelabhängigkeit der Messungen an Asphalt (Bodenvers.), Drehachsen horizontal, Fig. 22+23 - im rechten Winkel zu Sonnenazimuth, Fig. 24+25 - parallel zum Sonnenazimuth.

Im langwelligen Bereich ($6.5 - 20 \mu$) sind bei der hochstehenden Fettwiese (Fig. 19) die Messwerte ausgeglichen. Kleine Schwankungen treten auf beim gemähten Feld mit dem dadurch gestörten Strahlungstemperatur-Verhalten, da zusätzlich zu den oberen Pflanzenteilen auch der Boden einen Anteil am Messresultat hat (Fig. 21).

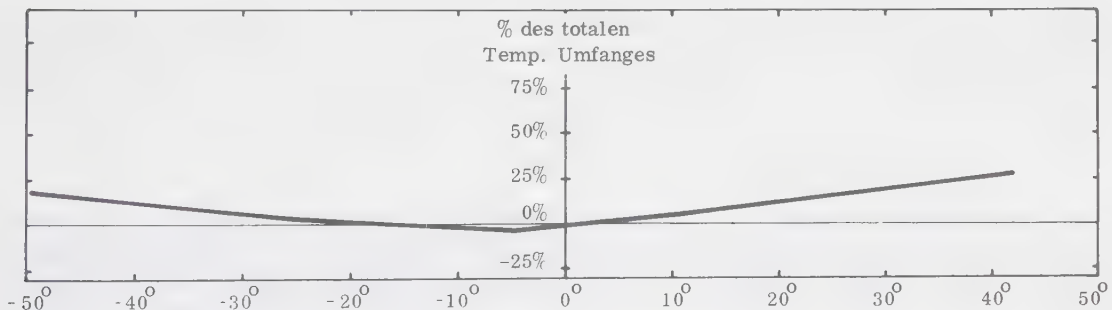
5.2.1.3. Interpretation der Messergebnisse am Asphalt (Messwerte s. Fig. 22 - 25)

Diese Messungen wurden auf dem Flugplatz Dübendorf über einer frisch asphaltierten Fläche durchgeführt.

Einzig im Bereich $3.8 - 8 \mu$ (Fig. 22) zeigt sich ein starkes Ansteigen der sonnwärts gerichteten Messwerte durch die direkte, gerichtete Reflexion von Sonnenstrahlung. Bei allen anderen Messungen (Fig. 23 - 25) sind die Ergebnisse sehr ausgeglichen, wobei lediglich im Bereich $6.5 - 20 \mu$ (Fig. 23 und 25) ein leichtes Absinken der Strahlungstemperaturen bei hohen Messwinkeln zu beobachten ist. Dies lässt sich durch das Nachströmen kühlerer Luft aus den, den Platz umgebenden Wiesen und deren Kühlwirkung auf den Platzrand erklären.

5.2.1.4. Flugversuche

Durch das Anfliegen des Testgeländes aus 4 verschiedenen Richtungen innerhalb von 6 Minuten, war es möglich, für den Bereich $3 - 5 \mu$ den Einfluss des Messwinkels in bezug auf das Sonnenazimuth zu untersuchen. Fig. 26 zeigt diese Winkelabhängigkeit, gemessen an einem klaren Tag mit Sonneneinstrahlung.



Sonnenhöhe = 36.8°

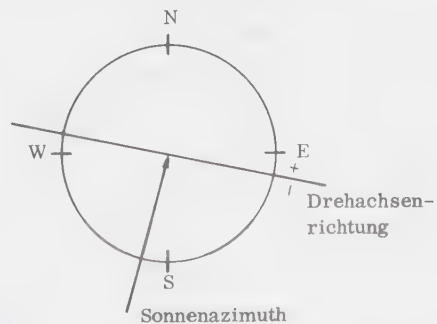


Fig. 26: Winkelabhängigkeit der Messungen an hochstehenden Fettwiesen, Flugversuche $3-5 \mu$, Messrichtung in Sonnenazimuth.

Mit zunehmendem Messwinkel zur Sonne hin als auch von der Sonne weg, zeigt sich ein Ansteigen der Strahlungswerte. Verschiedene Gründe können dafür verantwortlich gemacht werden, einer davon ist sicher die grössere direkte Reflexionswirkung von Sonnenstrahlung in dem der Sonne zugewandten Messbereich und andererseits die indirekte Reflexion der zur Sonne hin gerichteten Blätter im Messbereich von der Sonne weg.

Fig. 27 zeigt die gleiche Messanordnung bei bedecktem Himmel. Hier überwiegt der Faktor der Blattstellungen und der thermalen Emissionseffekte. Während im Messwinkel zur Sonne hin die dunkleren, kühleren Blattrückseiten gemessen werden, so sind es im Gegenfalle die helleren wärmeren Blattoberseiten, die zu einem Ansteigen der Werte beitragen.

Leider war es für den Bereich von $8 - 14 \mu$ wegen gerätetechnischen Schwierigkeiten nicht möglich die Messwinkelleffekte sauber von den allgemein überwiegenden scannerseitigen Fehlern (s. Kap. 5.2.2.) zu trennen. Ganz allgemein wurden in diesem Bereich nur die mittleren 2/3 des Bildstreifens verwendet um den komplizierten Randeffekten auszuweichen. Auf die Präsentation der $8 - 14 \mu$ Winkelmesswerte aus den Flugversuchen wird darum verzichtet.

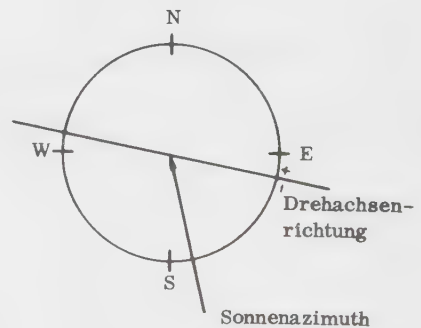
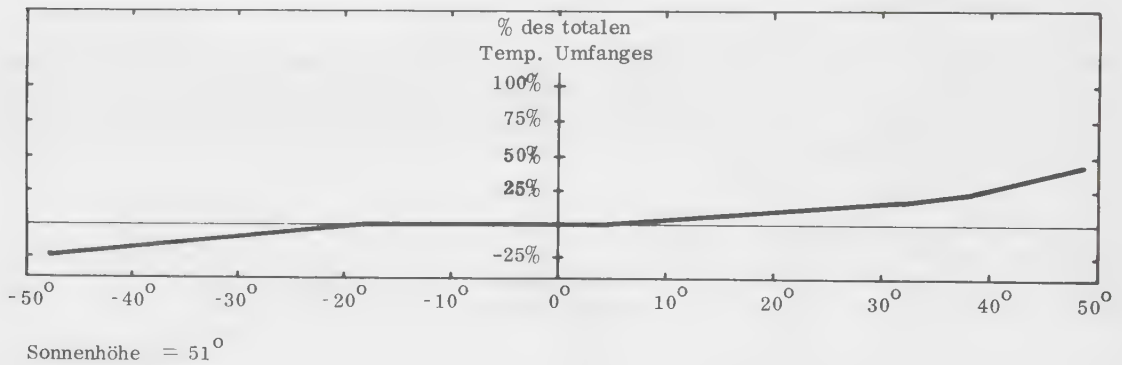


Fig. 27: Winkelabhängigkeit der Messungen an gemähten Fettwiesen, Flugversuche $3-5 \mu$, Messrichtung in Sonnenazimuth.

5.2.2. Einflüsse von scannerseitigen Fehlern¹⁾ und Möglichkeiten ihrer Korrektur

Abgesehen von allen möglichen geometrischen Fehlern, die durch unstabiles Flugverhalten während der Aufnahme entstehen und die oft dazu führen, dass nur ein kleiner zentraler Bereich des Bildstreifens zur Auswertung verwendet werden kann, wird hier nur auf einige scannerseitige Probleme hingewiesen. Es mussten einfache Methoden zur Beseitigung dieser "Fehler" gefunden werden, um die Daten wenigstens in einem gewissen Rahmen quantitativ verwenden zu können.

- Falsche V/H - Einstellung: Sie führt zu einer längenmässigen Verzerrung oder Kompression des Bildstreifens. Dadurch entstehen entweder Zwischenräume zwischen den Scanlinien oder die Linien überlappen sich. In beiden Fällen ist eine Neukalibrierung der Daten für Dichtemessungen (Kap. 4.6.) vorzunehmen. Da in dieser Arbeit für quantitative Zwecke sowieso nur einzelne, an Testflächen kalibrierte Scan-Profile verwendet wurden, erschwerten die V/H Fehler die Aufgabe nicht besonders.
Bei quantitativen Scannern und insbesondere bei flächenhafter Auswertung sind diese Probleme jedoch streng zu beachten.
Die gleichen Fehler können auch entstehen, wenn sich durch elektronische Defekte einerseits die Umdrehgeschwindigkeit des Scanners oder andererseits der Filmvorschub ändert.
- Kühlungsdefekte: Jede Erhöhung der Detektortemperatur durch einen Kühldefekt verstärkt das Detektorrauschsignal und vermindert die Empfindlichkeit und die Strahlungs-Auflösung des Systems.
- Filterprobleme: Da Indium-Antimonid- sowie Cadmium-Quecksilber-Tellurid-Detektoren über grössere Bereiche als 3 - 5 resp. 8 - 14 μ empfindlich sind, müssen immer entsprechende Bereichsbegrenzungsfilter mitverwendet werden. Besonders am Tage machen sich sonst störende Effekte von reflektierter Sonnenstrahlung bemerkbar.
- Verstärker-Uebertragungskennlinie: Diese Linie oder Funktion besagt, wie die einkommende Strahlung schliesslich in einen Dichtewert umgewandelt wird. Sie muss bei quantitativen Messungen überwacht werden, sodass wenn immer möglich im linearen Bereich der Uebertragungskurve gearbeitet werden kann.

1) Fehler, die durch falsche Einstellungen oder Defekte am Scanner hervorgerufen werden.

- Optisch-mechanische Fehler: Durch Defokussierung oder abweichende Reflexionseigenschaften der Spiegel des Scanning-Systems können sehr gravierende Fehler in der Wiedergabe auftreten.

Beim verwendeten HSD-212 Scanner trat dies gegen Ende der Testserie immer stärker zu- tage. Fig. 28 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Abtastmechanismus.

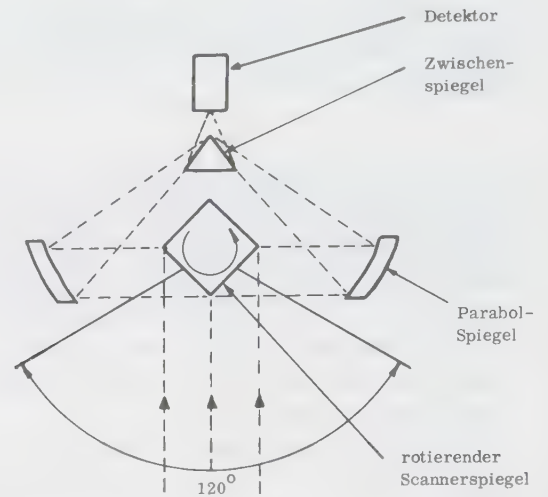


Fig. 28: Optisch - mechanisches Abtastsystem des HSD-212 8-14 μ Scanners (nach Hawker Siddeley Dyn. , 1973)

Ist beispielsweise der im Bild linke Spiegel etwas defokussiert oder in seinem Reflexionsvermögen gestört, so ergibt sich bei jedem Abtastvorgang eine einseitige Abschwächung des empfangenen Signals. Im Bildstreifen resultiert eine systematische einseitige Veränderung der Grauwerte bei allen Abtastlinien. Die räumliche- wie auch die thermale Auflösung wird unsymmetrisch randlich beeinflusst (engl. "shift", Fig. 29).

Um die Daten der mit den genannten Faktoren behafteten Flüge trotzdem gebrauchen zu können, wurden die Dichtewerte der betroffenen Bildstreifen in Flugrichtung für alle Abtastwinkel einzeln aufsummiert und dann miteinander verglichen. Fig. 30 gibt ein Beispiel einer so errechneten Korrekturkurve.

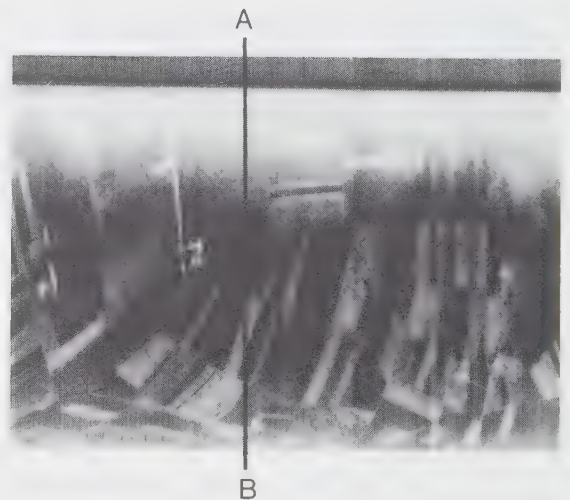


Fig. 29:
Unsymmetrien der Grauwertverteilungen durch optisch-mechanische Fehler.
8-14 μ Flug 12b vom 31.8.71, Zeit 14.49
Testgebiet "Mauensee" am oberen Bild-
rand. Profil A - B (s.Fig. 30).

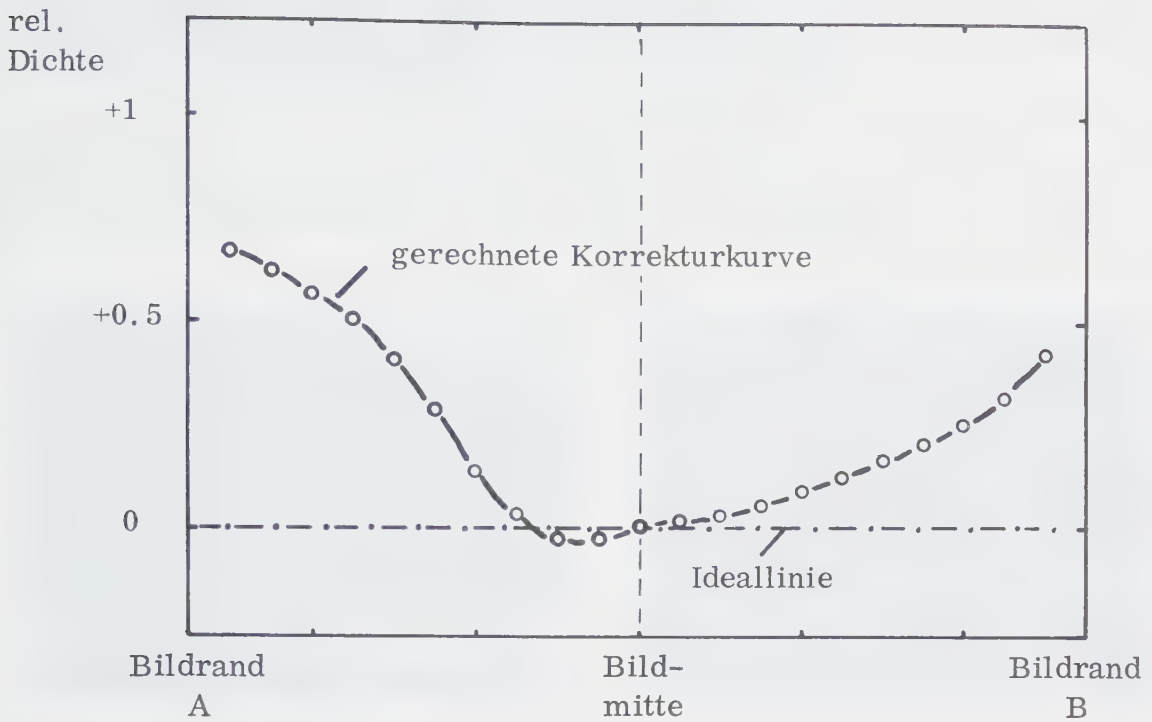


Fig. 30: Errechnete durchschnittliche Fehler-Korrekturkurve für die Negativ-Dichtewerte über ein Mikrodensitometer-Profil A-B (s. Fig. 29).

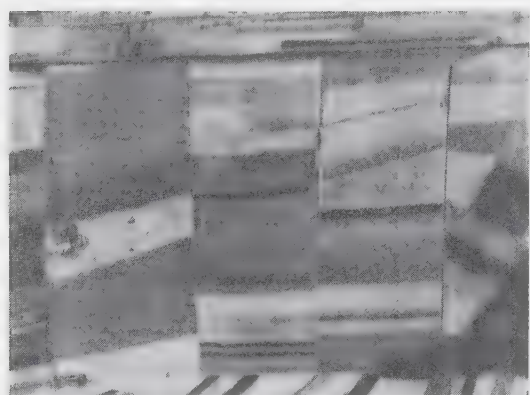
- Wiedergabematerial - und Verarbeitungsprobleme: Die Charakteristiken der bei direkter Bilderzeugung verwendeten Filme müssen bekannt sein (γ - Werte u. s. w.). Die Entwicklung soll immer unter kontrollierten Bedingungen vorgenommen werden, um quantitativ vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

In jedem Falle ist das Aufkopieren eines Stufen-Graukeils vor der Entwicklung empfehlenswert.

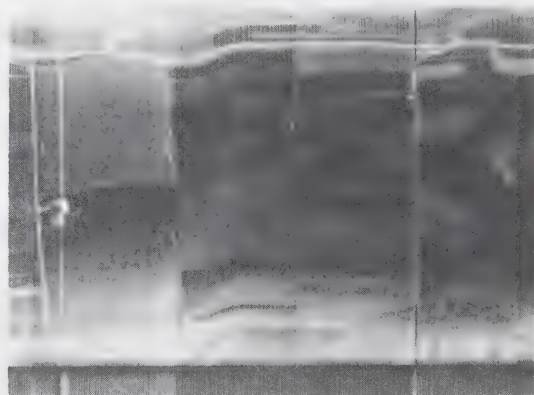
5.2.3. Spezielle Einflüsse

- Regen: Niederschlag hat allgemein einen auf die Oberflächentemperaturen ausgleichenden Einfluss. Durch heftige längerdauernde Regenfälle können die Temperaturdifferenzen weitgehend verschwinden. Wird der verbleibende Temperaturumfang vor dem Flug am Boden gemessen, so kann bei quantitativen Scannern durch abgestimmte Eichstrahler die thermale Empfindlichkeit des Geräts für den gewünschten Bereich optimiert werden.

Bei den verwendeten AGC-Scannern funktioniert diese Empfindlichkeits-Umschaltung automatisch. Den bei Regen aufgenommenen Bildern ist darum kaum ein Unterschied zu bei Sonnenschein gemachten Thermographien anzusehen, wenn man von den fehlenden Schattenwirkungen absieht (Fig. 31).



3-5 μ



8-14 μ

Fig. 31: Thermographien bei Regen, Testgebiet "Mauensee", Flug Nr. 11b vom 25.8.71, Zeit 14.58 .

- Wolkenschatten: Bei wechselnd bewölktem Wetter sind Infrarot-Befliegungen problematischer, da Einstrahlung mit Reflexion (im Bereich 3 - 5 μ) und reine Emission in den Wolkenschattenbereichen kurzfristig wechseln können. Den Bildern ist im Wolkenschatten der Kontrastverlust deutlich anzusehen (Fig. 32).



3-5 μ



8-14 μ

Fig. 32: Einfluss des Wolkenschattens auf die Abbildung in den beiden Infrarot-Bereichen, Testgebiet "Mauensee", Flug Nr. 25 vom 16.9.71, Zeit 10.30 .

Im Bereich $8 - 14 \mu$ zeigt sich in den Wolkenschattenzonen (untere Bildhälften) die deutliche Abnahme der Strahlungstemperatur-Unterschiede durch gedämpften Kontrast.

Die Auswertung derartiger Bilder bietet fast unüberwindliche Schwierigkeiten, da nur jene Bildpunkte quantitativ verwertet werden können, bei denen simultan zum Ueberflug Bodenmessungen durchgeführt worden sind.

6. DER ZUSAMMENHANG ZWISCHEN INFRAROT-EMISSION (8 - 14 μ) UND METEOROLOGISCHEN FAKTOREN

6.1. Ueberprüfung der PRT-10 Bodenmessdaten

Die Mittelwerte der PRT-10 Strahlungstemperatur-Messungen (Kap. 4.2.) der Kulturen werden statistisch verglichen mit den meteorologischen Messdaten der Lufttemperatur (LT), der relativen und der spezifischen Luftfeuchtigkeit (rel. F und spez. F) sowie der Windgeschwindigkeit (Wv). Mit diesen Untersuchungen soll die Eignung der Bodenmessdaten für die Kalibrierung der einzelnen Scanlinien abgeklärt werden.

Durch die Berechnung der linearen Korrelationen und Regressionen zwischen den PRT-10 Boden- und den einzelnen meteorologischen Variablen kann überprüft werden, ob zwischen den untersuchten Wertepaaren ein direkter linearer Zusammenhang besteht. Tab. 4 gibt einen Ueberblick über diese Werte der linearen Beziehungen. Am Beispiel der Messdaten der Fettwiesen werden die erwähnten Regressionen graphisch aufgezeigt (Fig. 33 - 36).

Tabelle 4: Lineare Korrelationskoeffizienten zwischen den Meteodaten und den PRT-10 Messungen

<u>Flächen</u>	<u>LT/PRT</u>	<u>rel. LF/PRT</u>	<u>spez. LF/PRT</u>	<u>Wv/PRT</u>
Fettwiesen	0.966	-0.800	0.795	0.589
Mais	0.978	-0.794	0.820	0.661
Rüben	0.977	-0.763	0.850	0.661
Kartoffeln	0.927	-0.855	0.674	0.482
Asphalt	0.939	-0.781	0.780	0.486

Verglichen wurden die gleichzeitig aufgenommenen Strahlungs- und Meteodaten, obwohl zu erwarten war, dass die Korrelationswerte zwischen den Infrarot-Bodenmessungen zur Zeit des Ueberflugs (T) und den Meteodaten einige Stunden später, höher sein würden. Dies darum, weil im Normalfalle die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit durch die Ausstrahlung der Felder und des Bodens bestimmt werden.

Interpretiert man die Resultate der Berechnungen (Tab. 4) und die graphischen Darstellungen, so kann gesagt werden, dass die Strahlungsbodenmessungen sinnvoll erscheinen, wenn sie mit den 4 Meteodatengruppen linear korreliert werden. Erwartungsgemäss sind die Korrelationen zur Lufttemperatur am grössten und die Zusammenhänge mit der Windgeschwindigkeit nicht so klar. Die Ueberprüfung, ob eine quadratische Korrelation eine wesentliche Verbesserung der Werte bringen würde, zeigte ein negatives Resultat. Die Verbesserungen waren sehr gering, sodass weiterhin mit linearen Abhängigkeiten gerechnet wird.

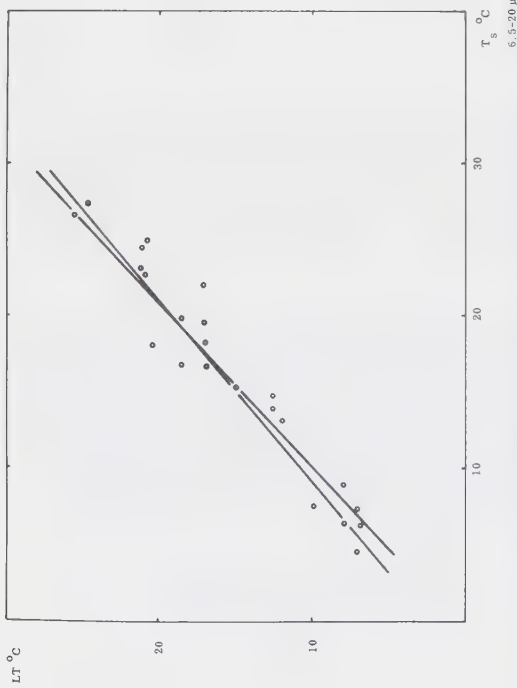


Fig. 33: Regressionsgeraden der Beziehungen zwischen Lufttemperatur (LT) und den PRT-10 Strahlungstemperaturen $6.5-20\ \mu\ (T_S)$.

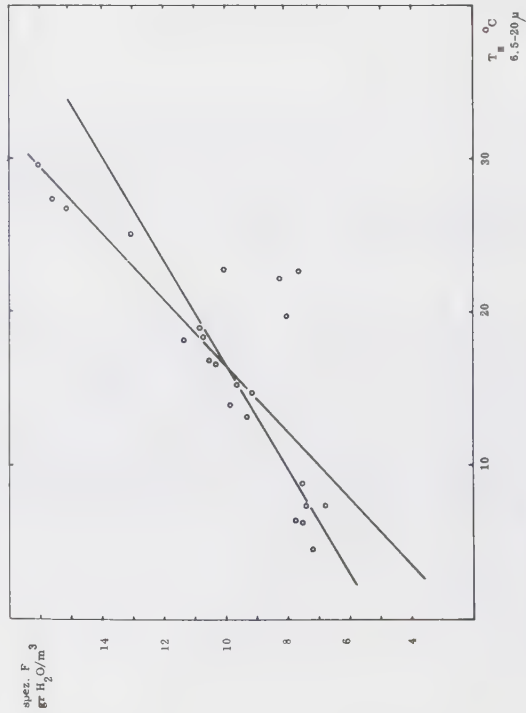


Fig. 35: Regressionsgeraden der Beziehungen zwischen spez. Luftfeuchtigkeit (spez. F) und den PRT-10 Strahlungstemperaturen $6.5-20\ \mu\ (T_S)$.

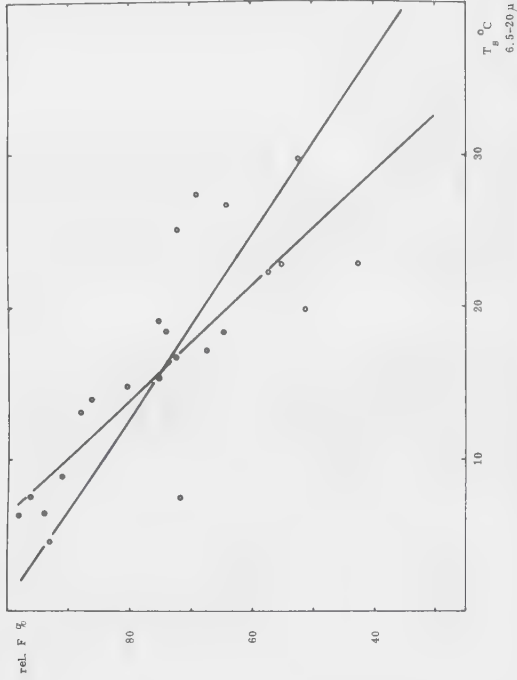


Fig. 34: Regressionsgeraden der Beziehungen zwischen rel. Luftfeuchtigkeit (rel. F) und den PRT-10 Strahlungstemperaturen $6.5-20\ \mu\ (T_S)$.

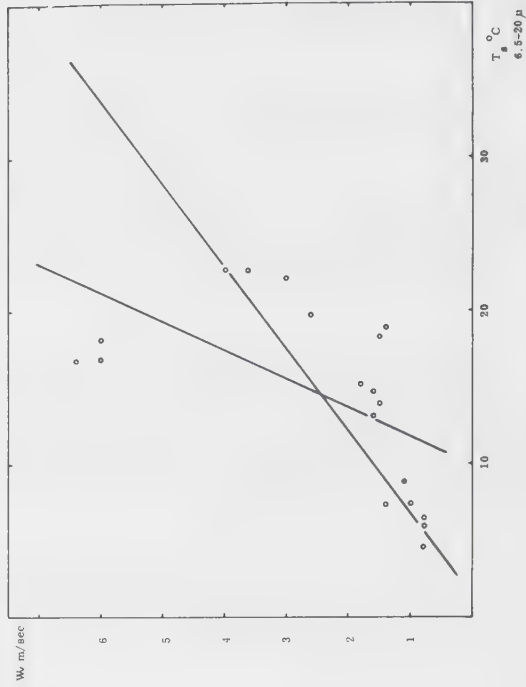


Fig. 36: Regressionsgeraden der Beziehungen zwischen Windgeschwindigkeit (Wv) und den PRT-10 Strahlungstemperaturen $6.5-20\ \mu\ (T_S)$.

6.2. Vergleich zwischen den PRT-10- und den 8 - 14 μ Scanner- messungen

Da die beiden Messinstrumente nicht in genau gleichen Spektralbereichen arbeiten, muss zuerst die Frage abgeklärt werden, ob die PRT-10 Bodenmessungen repräsentativ sind für die 8 - 14 μ Scannermessungen, bevor grössere Scanner-Messserien an den Bodenmessdaten kalibriert werden. Dafür werden die Scanner-Strahlungsmessungen von Fettwiesen mit den entsprechenden PRT-10 Bodendaten verglichen. Tab. 5 zeigt die linearen Korrelationen der Werte einiger ausgewählter Flüge. Die Fettwiesen bei diesem Vergleich zu benutzen hat zwei Gründe:

1. Von allen Kulturen hat es im Testgebiet am meisten Fettwiesen. Nur mit ihnen kann darum statistisch überhaupt gerechnet werden.
2. Die Fettwiesen zeigen dank unterschiedlicher Schnitt- und Reifegrade die grössten Strahlungstemperatur-Unterschiede. Die genauen Aufnahmen über den Reifezustand der einzelnen Felder sind dabei von grösster Wichtigkeit.

Tab. 5: Die linearen Korrelationen einiger ausgewählter Flüge¹⁾ zwischen den PRT-10
Messungen und den 8-14 μ Scannerdaten (Filmdichten) von Fettwiesen

Flug Nr.	lin. Korrelations- koeffizient r	Vertrauensbereich von r für p = 0.05 ²⁾	1) Es handelt sich um die Flüge bei denen, ohne jede weitere Korrektur von scannerseiti- gen Fehlern, die Scanner- daten linear verwendet werden konnten.
9 a	0.974	0.889 - 0.994	2) angepasst an die Anzahl Messungen
11 a	0.959	0.812 - 0.992	
16 a	0.9995	0.998 - 0.9999	
16 b	0.994	0.971 - 0.999	
22	0.949	0.791 - 0.988	
23	0.927	0.911 - 0.983	

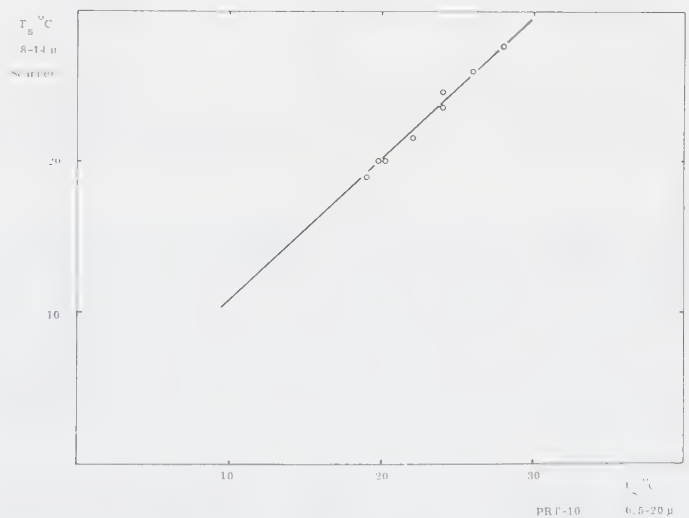


Fig. 37: Regressionsgerade der
Beziehungen zwischen den
PRT-10 und den 8-14 μ -
Scannermessungen,
Flug Nr. 16b vom 7.9.71,
Zeit 14.37 .

Aus den Berechnungen geht hervor, dass die Korrelationen der beiden Wertegruppen so hoch sind, dass dem nächsten Schritt, der Kalibrierung der einzelnen Scanlinien durch die Fettwiesen-Bodendaten nichts mehr im Wege steht. In Fig. 37 wird am Beispiel des Fluges 16 b eine graphische Darstellung der Messwerte und der Regressionsgeraden gezeigt.

6.3. Das Kalibrieren der 8 - 14 μ Infrarot-Strahlungstemperaturen

Durch die Einzeluntersuchungen in Kap. 6.1. und 6.2. wurde der Schritt vorbereitet, die Scanprofile des mit "AGC" (automatic gain control) und "AC-Coupling" (wechselstromgekuppelt) ausgerüsteten unkalibrierten HSD-Scanners (8 - 14 μ) mit den PRT-10 Bodenmessdaten von Fettwiesen zu kalibrieren. Durch die Verwendung von extremen Werten wurde erreicht, dass ein grosser Teil der Testflächen im linearen Bereich der Verstärker-Uebertragungsfunktion erfasst werden konnte.

Die hohen Korrelationen der emittierten IR-Strahlung im Bereich 8 - 14 μ mit den Meteodaten zeigen, dass die Referenz-Kalibrierung mit den Fettwiesenbodenmessungen mit dem PRT-10 sinnvoll sind.

Am Beispiel Mais soll gezeigt werden, wie die an Fettwiesen relativ kalibrierten Strahlungstemperatur-Werte mit den Meteodaten linear korrelieren (Tab. 6). Gleichzeitig wird die Frage gestellt, wie die Infrarotmessungen im Zeitpunkt des Ueberfluges (T) mit den meteorologischen Faktoren in Beziehung stehen, wenn diese zusätzlich in verschiedenen zeitlichen Abständen vor und nach dem Ueberflug gemessen und in der Rechnung verwendet werden. In Fig. 38 sind die Resultate mit den Vertrauensgrenzen graphisch dargestellt.

Tabelle 6: Die linearen Korrelationskoeffizienten der an Fettwiesen kalibrierten 8-14 μ Infrarot-Strahlungswerte mit den Meteodaten am Beispiel Mais 10

Zeitpunkt der Meteodaten (Ueberflug = T)	Korrelationskoeff. der Meteodaten mit der 8 - 14 μ Strahlungstemperatur			
	Lufttemp.	rel. Luftfeucht.	spez. Luftfeucht.	Windgeschw.
T - 4 Std.	0.361	- 0.343	0.157	0.538
T - 2 Std.	0.876	- 0.734	0.696	0.433
T - 1 Std.	0.917	- 0.791	0.673	0.605
T	0.980	- 0.888	0.788	0.699
T + 1 Std.	0.986	- 0.930	0.614	0.613
T + 2 Std.	0.956	- 0.962	0.589	0.632
T + 4 Std.	0.847	- 0.811	0.385	0.491

Besonders die zeitliche Variation bei den Wertepaaren bringt interessante Resultate, weil die Infrarot-Emission (8 - 14 μ) die "Strahlungsvorgeschichte" der Sonnenstrahlung widerspiegelt. Das Energiemaximum der Sonnenstrahlung liegt bei ca. 0.5 μ . Während sich Boden und Felder durch die Sonneneinstrahlung aufwärmen und Infrarot-Strahlung mit einem Energiemaximum um ca. 9.6 μ abgeben, so erwärmt sich die Lufttemperatur mit einer gewissen Verzögerung. Die beste Korrelation der Infrarot-Strahlungswerte zum Zeitpunkt des Ueberflugs (T) wird für die Lufttemperatur ungefähr im Zeitraum T + 1 Std. erreicht, während die relative Luftfeuchtigkeit ihr negatives Korrelationsmaximum um T + 2 Std. hat. Die spezifische Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit korrelieren am besten zur Zeit des Ueberflugs. Dies ist verständlich, verändert sich doch die vorhandene Wassermenge in der Luft aufgrund anderer Faktoren als Lufttemperatur + Luftfeuchtigkeit (Ausnahme Niederschlag), und auch der Wind hat einen sofortigen direkten Einfluss auf die Vegetationsoberflächen- resp. Blatt-Temperaturen. (Eller, 1971).

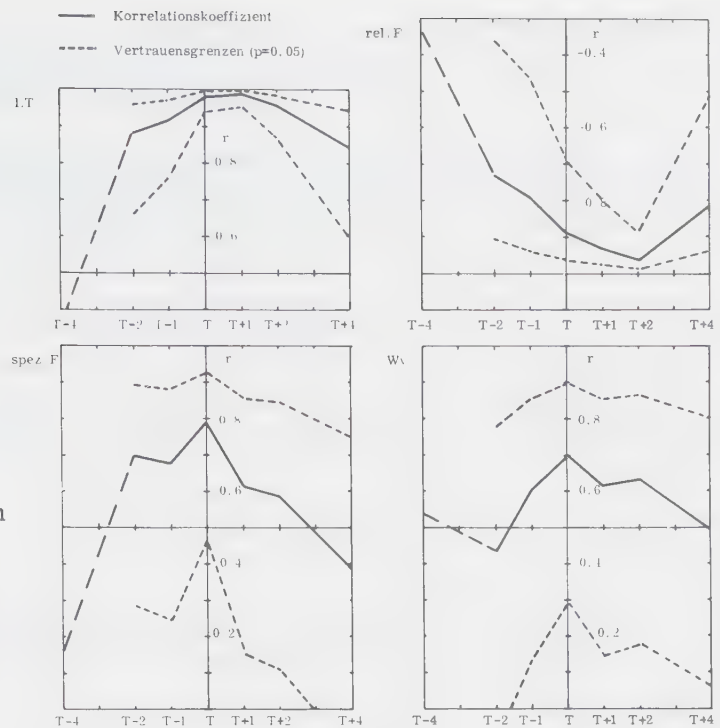


Fig. 38: Zeitabhängigkeit der linearen Korrelation zwischen der 8-14 μ IR-Strahlungstemp. zur Zeit T und den Meteodaten vor, während und nach dem Ueberflug T, am Bpl. Mais.

6.4. Der Zusammenhang zwischen meteorologischen Faktoren und der thermalen Infrarot-Emission im Bereich 8 - 14 μ

6.4.1. Einleitung

Mit der Methode der multiplen schrittweisen Regression wurden die kalibrierten Infrarot-Strahlungswerte (8 - 14 μ) aller Flüge für jedes Testfeld gesondert verglichen mit den Meteoromessungen vor, während und nach dem Ueberflug.

Für jedes Feld lassen sich detaillierte Verhaltensweisen und der Einfluss jeder einzelnen Variablen der Meteodaten bestimmen und erklären. Damit werden Lage-, Expositions-, Reife- und Ernteparameter in ihrer Wirkung fassbar.

Wenn man vom Zusammenhang zwischen meteorologischen Faktoren und der thermalen Infrarotstrahlung spricht und nicht von Abhängigkeiten, so sind 2 grundsätzlich verschiedene Fragestellungen auseinanderzuhalten:

1) Die Grundlagenforschung auf dem Gebiet des Remote Sensing:

Hier wird untersucht, welche Faktoren am Boden gemessen werden müssen, sodass mit einer guten Wahrscheinlichkeit die, durch Aeromethoden im Testgebiet zu erwartenden Infrarot-Strahlungsunterschiede abgeschätzt werden können. Auf diese Weise können Infrarot-Befliegungen optimiert werden.

2) Die meteorologische Fragestellung:

Es wird hier versucht abzuklären, mit welcher zeitlichen Verzögerung sich die gemessenen Infrarot-Emissionen in den 4 verwendeten meteorologischen Faktoren manifestieren.

In dieser Arbeit sollen beide grundsätzlichen Fragestellungen wenigstens teilweise bearbeitet werden, um einen besseren Einblick in ein komplexes Oekosystem zu gewinnen.

6.4.2. Die multiple lineare Regressions- und Korrelationsanalyse

Die abhängige Variable y (= 8 - 14 μ Scannermessungen) sei eine Funktion der Variablen x_1 (= Lufttemperatur), x_2 (= rel. Luftfeuchtigkeit), x_3 (= spez. Luftfeuchtigkeit) und x_4 (= Windgeschwindigkeit), die als eine lineare Kombination dargestellt werden kann:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 (+ e)$$

a_0 = Regressionskonstante

e = Unbestimmter Wert; zwischen tatsächlich beobachteten y und den mit Hilfe der Abhängigkeit von x_1 , x_2 , x_3 und x_4 berechneten $\hat{y}$. (Residualwerte).

Die Aufgabe besteht nun darin, für die Gleichung

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j x_j$$

die Regressionskonstante a_0 und die Regressionskoeffizienten a_j so zu bestimmen, dass die berechneten $\hat{y}$ -Werte den beobachteten y -Werten möglichst entsprechen (nach Steiner 1967 et al.).

Beim hier verwendeten Computerprogramm BMD-02R der "Health Science Computing Facility (UCLA)", wird schrittweise immer jene Variable in die Regression einbezogen, die am besten mit den bisher noch nicht erklärten Restwerten korreliert. Durch Quadrieren der Zuwachsraten zum Gesamtkorrelationswert kann der prozentuale Anteil, der durch jede Variable erklärt wird, errechnet werden. Durch den Signifikanztest werden nur solche Variablen in der Rechnung behalten, die schliesslich aussagekräftig sind.

In den folgenden Beispielen sind angegeben:

- Die Erklärungsprozentwerte für jede Variable
- Der gesamthaft durch die 4 Variablen mit der schrittweisen multiplen Regression erklärte prozentuale Anteil
- Die Reihenfolge, in der die Variablen in die Rechnung einbezogen werden
- Der lineare multiple Korrelationskoeffizient mit den Vertrauensgrenzen für $p = 0.05$

Von besonderer Wichtigkeit sind die Angaben über die Reihenfolge, in der die einzelnen Variablen in die multiple Regression eingetreten sind. Diese Reihenfolge führt zu einem optimalen Korrelationswert. Sie ermöglicht die Bedeutung der einzelnen Variablen abzuschätzen. Der prozentual erklärte Anteil jeder Variablen hingegen sagt, in Kombination mit der Reihenfolge höchstens aus, wieviele Schritte sich noch gelohnt haben, oder wo allenfalls bei einer erneuten Berechnung abgebrochen werden kann.

6.4.3. Berechnungen des Zusammenhangs zwischen Infrarot-Strahlungstemperaturen der Felder zum Zeitpunkt des Ueberflugs und den meteorologischen Parametern zu verschiedenen Zeiten vor, während und nach dem Ueberflug

Errechnet wurden 7 multiple lineare Regressionen für jeweils 18 Felder, mit den Daten von 15 Flügen, während eines Testzeitraumes von 4 Wochen. Die 18 Felder waren gegeben durch die Forderung einer möglichst hohen Ueberdeckungsrate, sodass die Anzahl der Einzelmessungen statistisch vertretbar blieb. Ueber die Lage der einzelnen Felder informiert Fig. 8.

Folgende Darstellung gibt einen Ueberblick über die verschiedenen durchgeführten Berechnungen.

Variablen 1 - 4 (Lufttemperatur, rel. und spez. Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit) zum Zeitpunkt:	Variable 5 (8 - 14 μ Strahlungstemperatur) zum Zeitpunkt:	Tabelle Nr:
T ¹⁾	T	7
T + 1	T	9
T + 2	T	12
T + 4	T	14
T - 1	T	16
T - 2	T	18 ²⁾
T - 4	T	-

In der angezeigten Reihenfolge werden die berechneten Resultate der multiplen Regressionen in tabellarischen Uebersichten dargestellt. Die linearen Korrelationsmatrizen der Meteovariablen sind zum besseren Verständnis der Resultate aufgeführt. Generelle Aussagen sowie die Erklärung von speziellen Werten sind den Tabellen beigelegt.

6.4.3.1. Meteofaktoren gemessen beim Ueberflug (Der Zusammenhang zwischen den 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen der einzelnen Felder und den Meteodaten zum Zeitpunkt T des Ueberflugs, Erklärungen z. Tab. 7+8)

Bei allen 18 untersuchten Feldern ist bei der schrittweisen multiplen Regression die Lufttemperatur wichtigster Faktor. Mit ihr allein können zwischen ca. 84 % und 97 % der Streuung der Strahlungstemperaturen aller Felder erklärt werden (im Durchschnitt 89,6 %).

Obwohl die direkte lineare Korrelation der Windgeschwindigkeit mit der Infrarot-Strahlungstemperatur relativ klein ist, folgt dieses Element in 14 von 18 Fällen als zweitwichtigste Variable in die multiple Regression. Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Infrarot-Strahlungstemperatur erklärt zusätzlich im Durchschnitt 2,2 % der Streuung.

Die Variable "rel. Luftfeuchtigkeit" kann als drittwichtigster Faktor betrachtet werden. Sie erklärt zusätzlich noch im Durchschnitt 1,8 % der Streuung der Infrarot-Strahlungswerte, erlangt aber nur dann grössere Bedeutung, wenn die Korrelation zwischen Lufttemperatur und Infrarotwerten kleiner wird (vergl. "Fettwiese 30"). Die lineare Korrelationsmatrix der 4 Meteofaktoren zeigt zum Beispiel die starke Bindung zwischen Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit.

1) T = Zeitpunkt des Ueberflugs

2) Die multiple Regression der Infrarot-Daten gemessen zum Zeitpunkt T des Ueberflugs mit den Meteodaten 4 Stunden früher, ergab Werte mit zu grossem Vertrauensbereich, sodass von einer Präsentation der Tabelle in diesem Bericht abgesehen wird.

Tab. 7: Erklärung der Streuung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen durch meteorologische Faktoren zum Messzeitpunkt T des Ueberfluges

Feldidenti- fikation	Variable 1 Lufttemp. erklärt in %	Variable 2 rel. Luftfeucht. erklärt in %	Variable 3 spez. Luftf. erklärt in %	Variable 4 Windgeschw. erklärt in %	Total erklärt in %	Reihenfolge in der Regression	linearer Kor- relationsko- effizient r	Vertrauensbereich von r für p=0.05 1)
Fettwiese 6	96.48	0.04	1.05	2.15	99.71	1 4 3 2	0.999	0.984 - 0.999
Ftw./Gerste 7	97.09	0.72	0.03	1.16	99.01	1 4 2 3	0.995	0.953 - 0.999
Rüben 8	94.65	1.07	1.14	1.02	97.88	1 4 2 3	0.989	0.938 - 0.998
Fettwiese 9	84.09	4.36	1.94	0.66	91.06	1 3 2 4	0.954	0.840 - 0.987
Mais 10	96.06	0.05	1.56	0.62	98.29	1 4 2 3	0.991	0.967 - 0.993
Fettwiese 11	89.60	3.56	0.23	3.33	96.74	1 2 4 3	0.984	0.942 - 0.996
Fettwiese 12	86.92	0.60	1.96	3.38	92.86	1 4 2 3	0.964	0.873 - 0.988
Rüben 13	84.61	0.19	2.21	4.99	91.99	1 4 2 3	0.959	0.857 - 0.989
Kartoffeln 14	89.31	0.77	0.41	3.77	94.27	1 4 2 3	0.971	0.897 - 0.992
Kartoffeln 16	86.47	4.00	1.38	3.78	95.64	1 4 3 2	0.978	0.921 - 0.994
Fettwiese 17	87.64	2.71	1.05	2.00	93.40	1 4 3 2	0.966	0.880 - 0.991
Ftw./Weizen 30	84.19	5.20	-	4.13	93.52	1 2 4 -	0.967	0.847 - 0.993
Rüben 31	88.89	1.79	0.28	3.49	94.97	1 4 2 3	0.975	0.911 - 0.993
Kartoffeln 32	87.80	2.35	0.07	1.57	91.79	1 4 3 2	0.958	0.853 - 0.989
Kartoffeln 33	89.78	1.72	0.05	1.88	93.42	1 4 3 2	0.967	0.890 - 0.991
Ftw./Hafer 34	87.60	1.31	0.28	0.65	89.83	1 4 3 2	0.948	0.821 - 0.986
Fettwiese 35	89.48	0.99	1.60	0.66	92.72	1 3 2 4	0.963	0.870 - 0.990
Fettwiese 36	92.08	0.51	1.10	0.45	94.12	1 4 2 3	0.970	0.894 - 0.992
Durchschnitt	89.60	1.78	0.91	2.21	94.51	(1)(4)(2)(3)		

1) Angepasst an die Anzahl Messungen

Tab. 8: Lineare Korrelationsmatrix der Meteodaten zum Zeitpunkt T des Ueberfluges

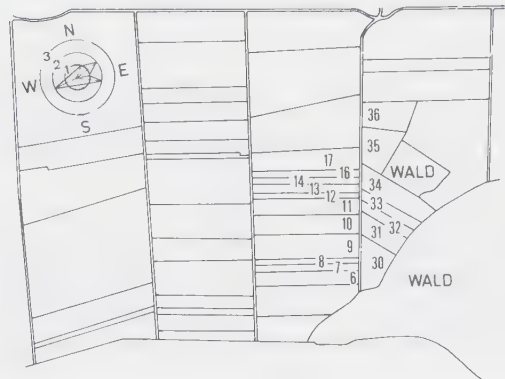
Variabel Nr.	1	2	3	4
1	1.000	-0.911	0.819	0.765
2		1.000	-0.518	-0.676
3			1.000	0.586
4				1.000

1 = Lufttemperatur
2 = rel. Luftfeuchtigkeit
3 = spez. Luftfeuchtigk.
4 = Windgeschwindigkeit.

Die Variable "spezifische Luftfeuchtigkeit" (gemessen in $\text{gr H}_2\text{O/m}^3$) ergibt mit durchschnittlich 0,9 % Zuwachs in der Erklärung der Infrarot-Strahlungstemperatur-Streuung die geringste Steigerung.

Die erstaunlich grosse Bedeutung der Windgeschwindigkeit lässt sich aus der Lage der Felder gut erklären. Die den Hauptwindrichtungen (Fig. 39) ausgesetzten Felder weisen bedeutend höhere Werte (bis 5 % Erklärungsanteil) auf als solche, die im Windschatten z.B. von Wäldchen liegen.

Fig. 39: Die Windverteilung während der Testperiode (Windpolygon). Die Distanzen 1, 2 resp. 3 vom Zentrum des Polygons geben die Anzahl der Ueberflüge bei mehr als 1.5 m/sec Wind an. Der Vergleich mit der Anbaukartierung erlaubt die Wirkung der Winde auf die Kulturen abzuschätzen.



Durch die multiple Regression können total zwischen 89,8 % und 99,7 % (Durchschnitt 94,5 %) der Streuung der Infrarot-Strahlungstemperatur im Bereiche 8 - 14 μ erklärt werden.

Wie bereits erwähnt, wird der bedeutendste Teil der emittierten Infrarot-Strahlung durch die Lufttemperatur erklärt. Einige tiefere Werte geben allerdings zu Erklärungen Anlass.

Bei "Fettwiese 9" fällt neben dem rel. niederen Wert der Variablen "Lufttemperatur" das Ansteigen der Bedeutung von relativer Luftfeuchtigkeit und spezifischer Luftfeuchtigkeit auf. Dieses etwas spezielle Verhalten kann darauf zurückgeführt werden, dass während der Testperiode die Wiese gemäht wurde. Das interaktive System zwischen Pflanze und Umgebung wurde dadurch gestört. Der kurz geschnittene Grasboden erhitze sich bei Einstrahlung viel schneller als bei anderen Wiesen, während sich dem Wind eine geringere Angriffsfläche bot.

Bei "Rüben 13" fallen besonders der niedrige Erklärungswert für die Lufttemperatur und die hohen Werte für die Variablen "spez. Luftfeuchtigkeit" und "Windgeschwindigkeit" auf. Durch die reihenweise Bepflanzung mit relativ grossen Abständen kann der Wind sehr gut die oberen Pflanzenteile beeinflussen und den direkten Einfluss der Lufttemperatur dämpfen. Neben dieser Erklärung für die rel. grosse Windabhängigkeit ist das natürliche Temperaturverhalten des Feldes aber auch darum gestört, weil sich der unbewachsene Boden zwischen den Pflanzenreihen bei Einstrahlung schneller erwärmt als die Pflanzenteile. Bei "Rüben 31" finden sich ganz ähnliche Verhältnisse, während bei den "Rüben 8" der Einfluss des nahen Waldes spürbar wird.

Bei den Feldern 11 - 16 lassen sich lagemässig die rel. hohen Windeinflüsse gut erklären. Diese Felder sind windexponiert, wenn man ihre Lage in Beziehung mit dem zur Testzeit aufgenommenen Windpolygon bringt (Fig. 39). Auf der anderen Seite ist der Windeinfluss bei den Feldern 7 - 10 ihrer relativ windgeschützten Lage wegen gering.

Die "Kartoffeln 16" wurden gegen Ende der Testperiode geerntet. Diese Sorte ist etwas früher reif als die anderen im Testgebiet angebauten. Das Blattwerk war schon grösstenteils verdorrt, sodass kaum Schattenwirkung oder Kühlungseffekte durch Verdunstung in Frage kamen. Die

Bodentemperaturen wurden darum sehr schnell extrem hoch, sodass bei der starken Verknüpfung von Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit bei abnehmender Korrelation der Lufttemperatur die rel. Luftfeuchtigkeit in der Bedeutung steigt.

Bei "Fettwiese 30" handelt es sich um ein Weizen-Stoppelfeld, das während der Testserie neu angesät wurde und schnell zuwuchs. Darum ist das Temperaturverhalten gestört und die Bedeutung der relativen Luftfeuchtigkeit erhöht. Durch eine extreme Kanalisierung der Hauptwinde während den Tests wurde der Windeinfluss (wie auch beim Nachbarfeld "Rüben 31") sehr gross.

6.4.3.2. Meteofaktoren gemessen 1 Std. nach dem Ueberflug

(Der Zusammenhang zwischen den 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen der einzelnen Felder zum Zeitpunkt T und den Meteodaten zur Zeit T+1, Erklärungen z. Tab. 9+10)

Wie schon im Falle der gleichen Messzeitpunkte von Strahlungstemperatur und Meteodaten (T/T) dominiert auch hier der Faktor "Lufttemperatur". Durchschnittlich werden allein durch diese Variable 92 % der Streuung der Infrarot-Strahlungstemperaturen erklärt. Die relativ tiefsten Werte treten wie auch schon beim Vergleich T/T bei den Feldern mit gestörtem Temperaturverhalten auf (insbes. Stoppelfelder, geerntete Felder etc.).

Die rel. Luftfeuchtigkeit ist noch stärker mit der Lufttemperatur verknüpft und bringt demnach nur sehr wenig zusätzliche Erklärung.

In 11 der 18 Fälle tritt der Faktor "spezifische Luftfeuchtigkeit" an zweiter Stelle in die Regression ein. Er erklärt durchschnittlich 1,6 % der Streuung der Strahlungswerte. Da es sich dabei im Gegensatz zur Windgeschwindigkeit um einen eher träge reagierenden Faktor handelt, ist diese Stellung verständlich.

Interessant sind die Felder, bei denen der Windgeschwindigkeit immer noch die zweitwichtigste Bedeutung zukommt. Es sind dies die besonders windexponierten Felder Nr. 6, 7, 12, 13, 14 und 31. Sie fallen in diese Kategorie, wenn ihr Temperaturverhalten nicht wie beispielsweise bei "Kartoffeln 16" gestört ist. Schon zum Meteo-Messzeitpunkt T (Tab. 7) bildete dieses Feld eine Ausnahme, bedingt durch Anbau und Reifegrad.

Bei der Variablen 3 ("spez. Luftfeuchtigkeit") verdienen einige Werte besondere Beachtung. Es betrifft dies vor allem die Felder 9, 11, 16, 17 und bes. 30, sowie 35. Mit Ausnahme des "Kartoffelfeldes 16", das wie bereits erwähnt sowohl im Temperatur- als auch im Windabhängigkeitsverhalten eine Ausnahme darstellt, sind alle anderen Felder Fettwiesen. Bei ihnen ist in dieser Regressionsrechnung der Windeinfluss relativ unbedeutend. Folgende Erklärung ist möglich. Die Windeinflüsse wirken schwach auf die eher niedrig-wüchsigen Fettwiesen ein. Zudem kann es sich beim Wind um ein träge wirkendes Phänomen handeln. Dagegen kann sich, nachdem offensichtlich mit der einstündigen Verzögerung die Oberflächentemperatur und die Lufttemperatur sich noch besser angepasst haben, auch die spez. Luftfeuchtigkeit in den erwähnten Fällen optimal angleichen. Insbesondere auch deshalb, weil der Wind, wie bereits erwähnt, keine entscheidend korrelierende Wirkung erzielen kann.

Der Einfluss der spez. Luftfeuchtigkeit ist sehr gering bei den in Waldnähe gelegenen Feldern 6, 7 und 8, da dort die Luftfeuchtigkeit nicht mehr direkt mit der Ein- und Abstrahlung zusammenhängt.

Tab. 9: Erklärung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen zur Zeit T des Ueberfluges durch meteorologische Faktoren zum Messzeitpunkt T+1 Std.

Feldidenti- fikation	Variable 1 Lufttemp. erklärt in %	Variable 2 rel. Luftfeucht. erklärt in %	Variable 3 spez. Luftf. erklärt in %	Variable 4 Windgeschw. erklärt in %	Total erklärt in %	Reihenfolge in der Regression	linearer Kor- relationsko- effizient r	Vertrauensbereich von r für p=0.05 1)
Fettwiese 6	95.69	0.08	-	2.12	97.90	1 4 2 -	0.989	0.899 - 0.999
Ftw./Gerste 7	96.21	0.47	0.01	1.24	97.92	1 4 3 2	0.990	0.871 - 0.998
Rüben 8	96.57	0.36	0.05	0.07	97.05	1 2 4 3	0.985	0.916 - 0.997
Fettwiese 9	86.44	2.84	3.60	0.89	93.78	1 3 2 4	0.968	0.887 - 0.991
Mais 10	97.21	0.21	0.14	0.00	97.56	1 3 2 4	0.988	0.956 - 0.997
Fettwiese 11	94.53	0.22	3.48	0.44	98.67	1 3 4 2	0.993	0.974 - 0.998
Fettwiese 12	93.14	0.15	0.55	1.28	95.11	1 4 3 2	0.975	0.911 - 0.993
Rüben 13	91.27	0.05	0.15	2.53	93.99	1 4 3 2	0.970	0.894 - 0.992
Kartoffeln 14	94.14	0.01	0.32	1.08	95.55	1 4 3 2	0.978	0.921 - 0.994
Kartoffeln 16	90.88	0.62	2.50	2.34	96.34	1 3 4 2	0.982	0.935 - 0.995
Fettwiese 17	90.73	1.15	2.59	0.89	95.36	1 3 2 4	0.977	0.918 - 0.994
Ftw./Weizen 30	87.40	1.84	8.67	0.29	98.20	1 3 2 4	0.991	0.949 - 0.998
Rüben 31	92.55	0.01	1.02	1.26	94.84	1 4 3 2	0.974	0.907 - 0.993
Kartoffeln 32	90.04	1.60	1.25	0.51	93.41	1 3 2 4	0.967	0.883 - 0.991
Kartoffeln 33	91.72	1.09	0.90	0.57	94.28	1 3 2 4	0.971	0.897 - 0.992
Ftw./Hafer 34	87.35	1.99	1.55	0.04	90.94	1 3 2 4	0.954	0.840 - 0.987
Fettwiese 35	90.47	1.31	2.01	0.27	94.06	1 3 2 4	0.970	0.894 - 0.992
Fettwiese 36	92.50	1.31	0.11	-	93.92	1 3 2 -	0.969	0.890 - 0.992
Durchschnitt	92.16	0.85	1.61	0.88	95.49			

1) Angepasst an die Anzahl Messungen

Tab. 10: Lineare Korrelationsmatrix der Metedaten zum Zeitpunkt T + 1 Std.

Variabel Nr.	1	2	3	4
1	1.000	-0.934	0.651	0.629
2		1.000	-0.343	-0.583
3			1.000	0.423
4				1.000

1 = Lufttemperatur
2 = rel. Luftfeuchtigkeit
3 = spez. Luftfeuchtigk.
4 = Windgeschwindigk.

Total wurde durch alle 4 Variablen im Durchschnitt 95,5 % der Streuung der Infrarot-Strahlungstemperatur erklärt. Damit liegt dieser Wert höher als beim Vergleich T/T. Wie schon bei Fig. 38, dem linearen Korrelationsvergleich, tritt unter den in der Testperiode herrschenden meteorologischen Verhältnissen ohne Kaltlufteinbrüche, eine verzögerte Wirkung der Infrarot-Ausstrahlung auf die Lufttemperatur ein. Auch kann damit ein höherer Prozentsatz der Streuung erklärt werden. Diese Verzögerung ist selbstverständlich bekannt, doch kann sie hier auf anderem Wege, über die Korrelation von meteorologischen Daten mit der langwelligen Infrarot-Ausstrahlung gezeigt werden.

Im folgenden wird versucht, mittels der berechneten Regressionsgleichungen einiger Felder die 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen zu bestimmen und diese Werte mit den gemessenen zu vergleichen (Tab. 11).

Tab. 11: Beispiele für die Berechnung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen aus den Resultaten der multiplen Regression

Berechnung für Flug 21, aus den 4 Meteovariablen zur Messzeit T+1 Std.

x_1 = Lufttemperatur:	19°C		
x_2 = rel. Luftfeuchtigkeit:	51 %		
x_3 = spez. Luftfeuchtigkeit:	8,3 gr/m ³		
x_4 = Windgeschwindigkeit:	1,9 m/sec		
<u>Regressions-Gleichung</u>		<u>berechneter Wert</u>	<u>gemessener Wert</u>
<u>Mais 10:</u>	$y = 1.61 x_1 + 0.16 x_2 - 1.12 x_3 - 0.03 x_4 - 10.96$	18.58°C	18.70°C
<u>Fettw. 11:</u>	$y = 0.13 x_1 - 0.18 x_2 + 1.95 x_3 + 0.27 x_4 + 8.17$	17.45°C	18.00°C
<u>Rüben 13:</u>	$y = 0.68 x_1 - 0.08 x_2 + 0.65 x_3 - 0.61 x_4 + 4.87$	18.87°C	20.60°C
<u>Kart. 14:</u>	$y = 0.68 x_1 - 0.03 x_2 + 0.43 x_3 - 0.34 x_4 + 2.37$	16.47°C	16.80°C

(eine Gegenüberstellung einer grösseren Anzahl von Feldern findet sich in Kapitel 8.1.)

6.4.3.3. Meteofaktoren gemessen 2 Std. nach dem Ueberflug

(Der Zusammenhang zwischen den 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen der einzelnen Felder zum Zeitpunkt T und den Meteodaten zur Zeit T+2, Erklärungen z. Tab. 12+13)

Da die Variablen "Lufttemperatur" und "rel. Luftfeuchtigkeit" stark korrelieren und in ihrer Bedeutung beinahe gleich geworden sind, da mehr oder weniger zufällig die eine oder andere zuerst in die multiple Regression eintritt, so sollen sie in der Folge gemeinsam betrachtet werden. Zusammen erklären sie durchschnittlich bereits 91,6 % der Streuung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen.

Die Variablen "spez. Luftfeuchtigkeit" und "Windgeschwindigkeit" haben mit 0,7 % resp. 0,2 % Anteil an der Streuungserklärung sehr geringe Bedeutung. Lediglich bei der spez. Luftfeuchtigkeit fallen 2 Felder mit etwas höheren Werten aus dem Rahmen. Es betrifft dies "Fettwiese 7" (ehem. Gerste) und "Fettwiese 30" (ehem. Weizen). Beide Felder sind in ihrem Verhalten durch die übriggebliebenen Stoppeln gestört. An manchen Stellen scheint der bare Boden durch, und offensichtlich hängt die Bodenfeuchtigkeit der obersten Schichten mit der spez. Luftfeuchtigkeit zusammen. Dies ist auch in kleinerem Masse bei den Feldern 16, 32 und 34 (ehem. Hafer) zu bemerken.

Tab.12: Erklärung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen zur Zeit T des Ueberflugs durch meteorologische Faktoren zum Messzeitpunkt T+2 Std.

Feldidenti- fikation	Variable 1 Lufttemp. erklärt in %	Variable 2 rel. Luftfeucht. erklärt in %	Variable 3 spez. Luftf. erklärt in %	Variable 4 Windgeschw. erklärt in %	Total erklärt in %	Reihenfolge in der Regression	linearer Kor- relationsko- effizient r	Vertrauensbereich von r für p=0.05 ¹⁾
Fettwiese 6	2.73	94.65	0.28	0.72	98.38	2 1 4 3	0.992	0.879 - 0.999
Ftw./Gerste 7	94.17	0.01	4.26	0.03	98.47	1 3 4 2	0.992	0.926 - 0.999
Rüben 8	96.68	1.09	0.01	0.16	97.93	1 2 4 3	0.990	0.944 - 0.998
Fettwiese 9	1.04	94.89	0.10	0.01	96.03	2 3 1 4	0.980	0.928 - 0.995
Mais 10	3.08	92.58	0.07	0.47	96.20	2 1 4 3	0.981	0.932 - 0.995
Fettwiese 11	97.04	0.15	0.29	-	97.48	1 3 2 -	0.987	0.956 - 0.996
Fettwiese 12	90.45	0.69	0.30	0.27	91.71	1 2 3 4	0.958	0.853 - 0.988
Rüben 13	88.06	1.67	0.62	0.60	90.95	1 2 4 3	0.954	0.840 - 0.987
Kartoffeln 14	88.85	0.90	-	-	89.75	1 2 - -	0.947	0.837 - 0.983
Kartoffeln 16	0.38	93.35	0.85	0.30	94.88	2 1 3 4	0.974	0.907 - 0.993
Fettwiese 17	0.25	93.72	0.42	0.01	94.40	2 1 3 4	0.972	0.900 - 0.992
Ftw./Weizen 30	93.69	0.82	2.25	0.18	96.94	1 3 2 4	0.985	0.916 - 0.998
Rüben 31	94.42	0.59	0.38	0.15	95.53	1 2 3 4	0.977	0.918 - 0.994
Kartoffeln 32	1.05	91.02	1.01	0.16	93.24	2 1 3 4	0.966	0.880 - 0.991
Kartoffeln 33	1.44	90.97	0.66	0.18	93.25	2 1 3 4	0.966	0.880 - 0.991
Ftw./Hafer 34	0.22	88.85	0.96	0.83	90.85	2 4 1 3	0.953	0.836 - 0.987
Fettwiese 35	0.12	92.46	0.03	0.26	92.87	2 4 1 3	0.964	0.873 - 0.990
Fettwiese 36	2.70	89.67	0.81	0.86	94.04	2 1 4 3	0.970	0.894 - 0.992
Durchschnitt					94.61			

1) Angepasst an die Anzahl Messungen

Tab.13: Lineare Korrelationsmatrix der Meteodaten zum Zeitpunkt T + 2 Std.

Variabel Nr.	1	2	3	4
1	1.000	-0.924	0.756	0.577
2		1.000	-0.456	-0.580
3			1.000	0.367
4				1.000

1 = Lufttemperatur
2 = rel. Luftfeuchtigkeit
3 = spez. Luftfeuchtigk.
4 = Windgeschwindigkeit.

Die Resultate richtig zu interpretieren fällt immer schwerer, insbesondere auch deshalb, weil die Unterschiede innerhalb der Felder z.B. beim Faktor "Windgeschwindigkeit" sehr klein und offenbar auch zufällig werden.

6.4.3.4. Meteofaktoren gemessen 4 Std. nach dem Ueberflug

(Der Zusammenhang zwischen den 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen der einzelnen Felder zum Zeitpunkt T und den Meteodaten zur Zeit T+4, Erklärungen z. Tab. 14+15)

Noch in 13 von 18 Fällen sind Lufttemperatur und rel. Luftfeuchtigkeit zusammengenommen die beiden wichtigsten Variablen in der multiplen Regression.

Die Interpretation wird jetzt sehr schwierig, da die direkten Einflüsse ganz offensichtlich nicht mehr klar zutage treten.

Lediglich die Aussage, dass mit den 4 verwendeten Meteovariablen jetzt noch total 87,3 % der Streuung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen erklärt werden, sagt etwas über den Trend der Zeitreihe aus. Die Vertrauensgrenzen für den immer noch recht hohen Korrelationskoeffizienten sind der Tabelle zu entnehmen.

Bei der linearen Korrelationsmatrix fällt auf, dass der Zusammenhang zwischen den Variablen 1 und 2 gelockert wurde und dass eine gesicherte lineare Korrelation zwischen relativer und spezifischer Luftfeuchtigkeit (Variable 2/Variable 3) überhaupt nicht mehr existiert.

6.4.3.5. Meteofaktoren gemessen 1 Std. vor dem Ueberflug

(Der Zusammenhang zwischen den 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen der einzelnen Felder zum Zeitpunkt T und den Meteodaten zur Zeit T-1, Erklärungen z. Tab. 16+17)

Diese Werte und Tabellen können am besten mit den Resultaten aus der Rechnung T/T (Tab. 7 + 8) verglichen werden. Dort erklären die 4 verwendeten Meteovariablen durchschnittlich 94,5 % der Infrarot-Strahlungstemperatur (8 - 14 μ). In der Korrelation mit den Meteodaten eine Stunde vor dem Ueberflug sinkt diese totale Erklärbarkeit auf 89,9 % ab.

Dies besagt nun meteorologisch, dass im Zeitraum der Testflüge wenig Kaltlufteinbrüche eintraten, da die Fälle, wo die Bodentemperatur durch die Lufttemperatur bestimmt werden, offensichtlich keine Bedeutung erlangten. Insbesondere ist dies deutlich, wenn man das Absinken der Erklärung der Infrarot-Strahlungswerte durch die Lufttemperatur auf durchschnittlich 77,3 % beachtet (beim Falle T/T waren es noch 89,6 %). Hier muss aber bemerkt werden, dass die Lufttemperatur immer noch die wichtigste Variable darstellt. Ebenso ist die Bindung (lineare Korrelation) zwischen den Variablen 1 und 2 noch relativ gross.

Da der ursächliche Zusammenhang zwischen den 8 - 14 μ Strahlungswerten, der Lufttemperatur und der rel. Luftfeuchtigkeit nicht mehr gewährt ist, wird eine Interpretation der extremen Abweichungen vom Mittel bei den Variablen 1 und 2 sehr schwierig. Statistische Zufälligkeiten, wie z.B. die hohen Erklärungswerte der beiden Faktoren bei den Feldern 6, 7, 8 und 9 hängen einerseits damit zusammen, dass durch die randliche Lage im Bild die Daten oft nicht verwendet werden konnten und somit für die Rechnung in einer kleineren Anzahl von Fällen zur Verfügung standen. Trotzdem scheint sich aber die Waldnähe vorteilhaft auf die Erklärbarkeit auszuwirken, da jene Felder durchwegs bessere Total-Erklärungen erreichen. Bei Feld 30 ist dieser Effekt einmal mehr gestört durch die Weizenstopeln und die Windkanalisation. Der Wald beeinflusst die in der Nähe liegenden Felder nachhaltig. Dies heisst offenbar, dass besonders aus dem Walde ausfliessende kühlere Luft die Strahlungstemperatur beeinflusst.

Tab. 14: Erklärung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen zur Zeit T des Ueberflugs durch meteorologische Faktoren zum Messzeitpunkt T+4 Std.

Feldidenti- fikation	Variable 1 Lufttemp. erklärt in %	Variable 2 rel. Luftfeucht. erklärt in %	Variable 3 spez. Luftf. erklärt in %	Variable 4 Windgeschw. erklärt in %	Total erklärt in %	Reihenfolge in der Regression	linearer Kor- relationsko- effizient r	Vertrauensbereich von r für p=0. 05 1)
Fettwiese 6	6. 05	91. 98	0. 02	0. 34	98. 39	2 1 4 3	0. 992	0. 879 - 0. 999
Ftw./Gerste 7	21. 59	75. 57	0. 06	0. 20	97. 41	2 1 4 3	0. 987	0. 882 - 0. 999
Rüben 8	79. 98	12. 03	0. 04	-	92. 05	1 2 3 -	0. 959	0. 812 - 0. 992
Fettwiese 9	0. 04	79. 16	6. 22	0. 44	85. 86	2 3 4 1	0. 927	0. 754 - 0. 980
Mais 10	71. 82	13. 70	0. 03	0. 31	85. 86	1 2 4 3	0. 927	0. 754 - 0. 980
Fettwiese 11	91. 12	3. 01	0. 26	0. 08	94. 48	1 2 3 4	0. 972	0. 900 - 0. 992
Fettwiese 12	81. 66	3. 81	-	0. 04	85. 51	1 2 4 -	0. 925	0. 763 - 0. 978
Rüben 13	75. 96	-	5. 58	0. 11	81. 65	1 3 4 -	0. 904	0. 703 - 0. 971
Kartoffeln 14	76. 02	5. 79	0. 24	-	82. 05	1 2 3 -	0. 906	0. 709 - 0. 972
Kartoffeln 16	12. 43	69. 19	0. 04	0. 83	82. 49	2 1 4 3	0. 908	0. 698 - 0. 974
Fettwiese 17	9. 80	72. 66	-	0. 32	82. 78	2 1 4 -	0. 910	0. 720 - 0. 973
Ftw./Weizen 30	90. 67	0. 64	0. 03	1. 39	92. 73	1 4 2 3	0. 963	0. 804 - 0. 993
Rüben 31	81. 16	7. 73	0. 03	0. 06	88. 98	1 2 4 3	0. 943	0. 804 - 0. 984
Kartoffeln 32	10. 17	75. 22	0. 04	0. 32	85. 75	2 1 4 3	0. 926	0. 751 - 0. 979
Kartoffeln 33	11. 54	73. 27	0. 04	0. 25	85. 11	2 1 4 3	0. 923	0. 742 - 0. 979
Ftw./Hafer 34	7. 61	74. 18	0. 02	-	81. 80	2 1 3 -	0. 904	0. 703 - 0. 971
Fettwiese 35	-	69. 71	9. 75	-	79. 46	2 3 - -	0. 891	0. 684 - 0. 965
Fettwiese 36	-	74. 17	13. 91	0. 07	88. 15	2 3 4 -	0. 939	0. 804 - 0. 982
Durchschnitt					87. 25			

1) Angepasst an die Anzahl Messungen

Tab. 15: Lineare Korrelationsmatrix der Meteodaten zum Zeitpunkt T + 4 Std.

Variabel Nr.	1	2	3	4
1	1. 000	-0. 612	0. 740	0. 460
2		1. 000	0. 069	-0. 393
3			1. 000	0. 245
4				1. 000

1 = Lufttemperatur
2 = rel. Luftfeuchtigkeit
3 = spez. Luftfeuchtigk.
4 = Windgeschwindigk.

Tab. 16: Erklärung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen zur Zeit T des Ueberflugs durch meteorologische Faktoren zum Messzeitpunkt T-1Std.

Feldidenti- fikation	Variable 1 Lufttemp. erklärt in %	Variable 2 rel. Luftfeucht. erklärt in %	Variable 3 spez. Luftf. erklärt in %	Variable 4 Windgeschw. erklärt in %	Total erklärt in %	Reihenfolge in der Regression	linearer Kor- relationsko- effizient r	Vertrauensbereich von r für p=0.05 1)
Fettwiese 6	93.31	3.75	2.75	0.04	99.85	1 2 3 4	0.999	0.984 - 0.999
Ftw./Gerste 7	91.08	1.39	4.13	0.86	97.47	1 4 2 3	0.987	0.882 - 0.998
Rüben 8	84.30	2.25	4.25	1.06	91.86	1 2 3 4	0.958	0.780 - 0.993
Fettwiese 9	69.63	15.74	3.39	1.94	95.24	1 3 2 4	0.952	0.833 - 0.987
Mais 10	84.17	0.28	8.08	1.17	93.70	1 4 2 3	0.968	0.887 - 0.991
Fettwiese 11	73.93	4.08	3.03	2.71	83.75	1 2 3 4	0.915	0.718 - 0.976
Fettwiese 12	71.87	1.08	5.26	2.63	80.84	1 4 2 3	0.899	0.672 - 0.972
Rüben 13	70.63	0.30	5.32	3.96	80.21	1 4 2 3	0.896	0.663 - 0.971
Kartoffeln 14	77.59	1.71	4.78	3.55	87.63	1 4 2 3	0.936	0.782 - 0.982
Kartoffeln 16	72.34	13.34	1.61	5.39	92.94	1 4 3 2	0.964	0.873 - 0.990
Fettwiese 17	75.43	11.59	1.60	3.11	91.74	1 4 3 2	0.958	0.853 - 0.988
Ftw./Weizen 30	67.72	11.83	0.11	4.25	83.91	1 2 4 3	0.916	0.596 - 0.985
Rüben 31	72.43	1.85	4.39	2.42	90.05	1 4 2 3	0.901	0.678 - 0.972
Kartoffeln 32	74.85	11.85	0.41	2.37	89.50	1 4 3 2	0.946	0.814 - 0.985
Kartoffeln 33	77.46	10.16	0.35	2.48	90.45	1 4 3 2	0.951	0.830 - 0.987
Ftw./Hafer 34	77.27	10.30	0.81	1.43	89.81	1 4 3 2	0.948	0.821 - 0.986
Fettwiese 35	77.94	8.44	2.41	1.18	89.96	1 3 2 4	0.949	0.824 - 0.986
Fettwiese 36	78.59	0.69	9.74	0.76	89.77	1 4 2 3	0.948	0.821 - 0.986
Durchschnitt	77.25	6.15	2.47	2.30	89.93			

1) Angepasst an die Anzahl Messungen

Tab. 17: Lineare Korrelationsmatrix der Meteodaten zum Zeitpunkt T - 1 Std.

Variabel Nr.	1	2	3	4
1	1.000	-0.876	0.764	0.739
2		1.000	-0.367	-0.572
3			1.000	0.668
4				1.000

1 = Lufttemperatur
2 = rel. Luftfeuchtigkeit
3 = spez. Luftfeuchtigk.
4 = Windgeschwindigkeit.

Diese Wirkung fällt bei näherer Betrachtung aller anderen Rechnungen überall auf. Offenbar bringt die Waldnähe ganz allgemein eine bessere Korrelation der Infrarot-Strahlungstemperaturen mit der Lufttemperatur und der rel. Luftfeuchtigkeit zustande. Möglicherweise ist der regulierende, alle Extremwerte dämpfende Effekt des Waldes die allgemeine Erklärung.

Für den Bauern bedeutet dies, dass er frostempfindliche Kulturen besser in Waldnähe anbaut, wenn dadurch nicht infolge extremer Kanalisierung oder Verwirbelung der Hauptwinde eine Gefahr von anderer Seite entsteht.

Beim Mais manifestiert sich die Waldnähe indes in einem verzögerten Wachstum und Reifegrad gegenüber gleichen Kulturen in ungeschützter Lage.

Obwohl der Wind selbst nur einen Anteil von 2,3 % zum total erklärten Betrag hinzufügt, ist er in 12 von 18 Fällen die zweitwichtigste Variable in der multiplen Regression und ermöglicht, in Kombination mit den Variablen 2 und 3, einen doch bedeutenden Anstieg der Totalerklärbarkeit von 77 auf fast 90 %.

6.4.3.6. Meteofaktoren gemessen 2 Std. vor dem Ueberflug

(Der Zusammenhang zwischen den 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen der einzelnen Felder zum Zeitpunkt T und den Meteodaten zur Zeit T-2, Erklärungen z. Tab. 18+19)

Bei diesen Berechnungen wurden alle Flüge kurz nach Sonnenuntergang nicht miteinbezogen, da sonst der Wechsel zwischen Daten mit Einstrahlung und Daten ohne Einstrahlung zu wenig sinnvollen Ergebnissen geführt hätte.

Total werden durch die 4 Meteo-Variablen noch 77,9 % der Streuung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen der Felder erklärt. Durch die erwähnte Verkleinerung der Anzahl der untersuchten Flüge und die allgemein niedrigen Korrelationen sind die Vertrauensbereiche für die Korrelationskoeffizienten sehr gross geworden. Werden diese Werte der Vertrauensgrenzen quadriert, so erhält man ein Mass für die Vertrauensgrenzen der prozentualen Erklärung. Daher ist einzusehen, dass die Werte als solche nicht mehr exakt verglichen werden können — es lassen sich lediglich Tendenzen aufzeigen.

Der Faktor "Lufttemperatur" erklärt allein noch ca. 67,9 % der Streuung der 8 - 14 μ Infrarot-Strahlungstemperatur. Bei "Fettwiese 30" wird der kleine Wert durch grössere Erklärungsbedeutung der anderen Variablen kompensiert.

Die Variablen 1 und 2 korrelieren linear recht stark, darum erhält die relative Luftfeuchtigkeit kaum noch Bedeutung in der multiplen Regression.

Bei 13 der 18 Felder ist der Windeinfluss zweitwichtigster Faktor in der Rechnung. Zu besonders hohen Werten kommt es in den Windhindernis- und Kanalisationszonen in Waldnähe. Die Variable "spez. Luftfeuchtigkeit" zeigt ein ähnliches Verhalten.

Tab. 18: Erklärung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen zur Zeit T des Ueberflugs durch meteorologische Faktoren zum Messzeitpunkt T-2 Std.

Feldidenti- fikation	Variable 1 Lufttemp. erklärt in %	Variable 2 rel. Luftfeucht. erklärt in %	Variable 3 spez. Luftf. erklärt in %	Variable 4 Windgeschw. erklärt in %	Total erklärt in %	Reihenfolge in der Regression	linearer Kor- relationsko- effizient r	Vertrauensbereich von r für p=0.05 1)
Fettwiese 6	72.23	-	12.17	15.41	99.81	1 3 4 -	0.999	0.951 - 0.999
Ftw./Gerste 7	69.55	-	5.84	19.72	95.12	1 3 4 -	0.975	0.667 - 0.998
Rüben 8	67.67	1.53	4.57	9.63	83.41	1 3 2 4	0.913	0.393 - 0.991
Fettwiese 9	55.84	-	0.25	6.02	62.11	1 4 3 -	0.788	0.315 - 0.948
Mais 10	76.76	-	1.46	1.70	79.91	1 4 3 -	0.894	0.605 - 0.975
Fettwiese 11	73.58	-	2.71	3.43	79.72	1 3 4 -	0.893	0.601 - 0.975
Fettwiese 12	69.00	-	0.20	2.22	71.43	1 4 3 -	0.845	0.461 - 0.963
Rüben 13	66.55	-	-	4.13	70.68	1 4 - -	0.841	0.486 - 0.958
Kartoffeln 14	75.66	-	1.55	5.90	83.11	1 4 3 -	0.912	0.662 - 0.979
Kartoffeln 16	62.74	0.06	6.49	8.44	77.73	1 4 2 3	0.882	0.524 - 0.975
Fettwiese 17	66.10	-	0.05	5.89	72.03	1 4 3 -	0.849	0.471 - 0.964
Ftw./Weizen 30	58.49	4.89	8.88	9.72	81.97	1 3 2 4	0.905	0.354 - 0.990
Rüben 31	66.33	-	2.39	3.13	71.85	1 4 3 -	0.848	0.468 - 0.963
Kartoffeln 32	65.70	-	1.02	6.15	72.87	1 4 3 -	0.854	0.484 - 0.964
Kartoffeln 33	69.81	-	0.99	6.46	77.26	1 4 3 -	0.879	0.559 - 0.971
Ftw./Hafer 34	66.77	-	1.48	4.62	72.86	1 4 3 -	0.854	0.484 - 0.964
Fettwiese 35	69.17	-	0.35	4.18	73.69	1 4 3 -	0.858	0.498 - 0.966
Fettwiese 36	70.76	-	3.19	2.98	76.93	1 4 3 -	0.877	0.553 - 0.971
Durchschnitt					77.92			

1) Angepasst an die Anzahl Messungen

Tab. 19: Lineare Korrelationsmatrix der Meteodaten zum Zeitpunkt T - 2 Std.

Variabel Nr.	1	2	3	4
1	1.000	-0.875	0.740	0.612
2		1.000	-0.323	-0.428
3			1.000	0.627
4				1.000

1 = Lufttemperatur
2 = rel. Luftfeuchtigkeit
3 = spez. Luftfeuchtigk.
4 = Windgeschwindigkeit.

6.4.3.7. Meteofaktoren gemessen 4 Std. vor dem Ueberflug

(Der Zusammenhang zwischen den 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen der einzelnen Felder zum Zeitpunkt T und den Meteodaten zur Zeit T-4)

Auf eine ausführliche Darstellung dieser Berechnungen wird wie bereits erwähnt verzichtet, da die Anzahl der bei der Rechnung verwendeten Flüge weiter reduziert werden musste. Das allgemeine Absinken der Korrelationen sowie die kleinere Anzahl der Daten führt zu äusserst weiten Vertrauensbereichen, die eine sinnvolle Interpretation nicht mehr zulassen.

Es kann lediglich ausgesagt werden, dass die Bedeutung der Lufttemperatur bei der Erklärung der 8 - 14 μ Strahlungswerte sehr klein geworden ist. Die Windgeschwindigkeit weist bei wald-nahen Feldern den wichtigsten Anteil am Erklärungsfaktor auf. Die Variable "rel. Luftfeuchtigkeit" reagiert in ihrem Verhalten ähnlich, ist aber unbedeutend im Anteil der Erklärung, während der Faktor "spez. Luftfeuchtigkeit" in genau entgegengesetzter Weise (waldferne Felder) den zweitwichtigsten Anteil ergibt.

6.4.4. Zusammenfassung der Resultate der Regressionsrechnungen

Fig. 40 - 43 zeigen Einzelbeispiele für die Zeitabhängigkeit der Wechselwirkungen (Korrelationen) zwischen der Strahlungstemperatur der Testfelder zur Zeit T und den meteorologischen Daten zu den Zeiten T-4, T-2, T-1, T, T+1, T+2 und T+4 mit den Vertrauensgrenzen für $p=0.05$. Zusätzlich ist der Einfluss der Variablen "Lufttemperatur" dargestellt.

Fig. 40 - 43: (Erkl. s. Text)

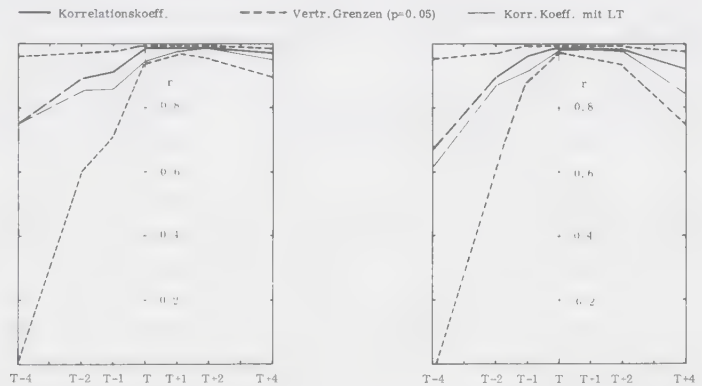


Fig. 40: "Fettwiese 11"

Fig. 41: "Mais 10"

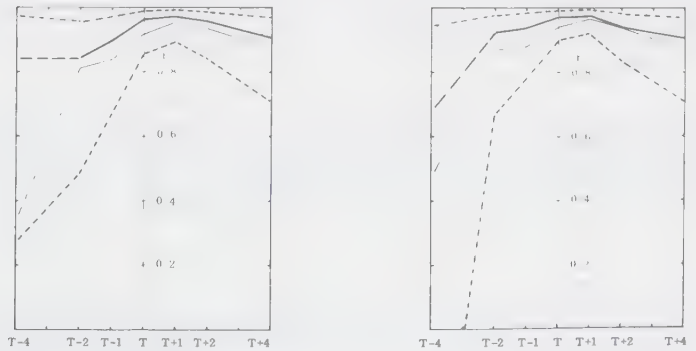


Fig. 42: "Rüben 13"

Fig. 43: "Kartoffeln 14"

Der Vergleich der Strahlungswerte mit den um eine Stunde später gemessenen Meteodaten aller 4 Variablen erbrachte den höchsten Erklärungswert der Streuung der 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen.

Betrachtet man einmal nur die Anteile der beiden linear am besten mit den Infrarotdaten korrelierenden Variablen "Lufttemperatur" und "relative Luftfeuchtigkeit" und untersucht, mit welcher Verzögerung der Messung der Meteodaten die multiplen Korrelationswerte maximal sind, so ergeben sich folgende Werte:

- Fettwiesen	T+1.7 Std.
- Rüben	T+1.5 Std.
- Kartoffeln	T+1.8 Std.
- Mais	T+1 Std. ¹⁾
- Rest (Stoppelfelder)	T+1.3 Std.
Durchschnitt	T+1.6 Std.

Alle diese Werte sind nicht als solche weiterzuverwenden, da durch die stundenweise Messung nur ein allgemeiner Hinweis auf die Verzögerungsdauer möglich ist. Genauere Resultate können erreicht werden, wenn dieselben multiplen Regressionen in kürzeren Zeitintervallen (z.B. alle 10 Min.) durchgeführt werden. Gleichwohl sind die erreichten Resultate in grössenordnungsmässiger Uebereinstimmung mit den allgemeinen strahlungsmeteorologischen Theorien.

Als Hauptresultat kann aus den Regressionsrechnungen gefolgert werden, dass jedes Feld im 8 - 14 μ Infrarot-Strahlungstemperaturverhalten ein Individuum darstellt, dessen Reaktionen bestimmt werden durch seine Anbauart, seine Lage, Exposition, seinen Wachstumszustand und Reifegrad sowie durch seine Nachbarbeziehungen.

Die Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit konnte unter den gegebenen Umständen (verwendete Geräte und Flugzeiten) nicht abschliessend untersucht werden (Kap. 8.4.).

Mit den Faktoren "Lufttemperatur", "relative und spezifische Luftfeuchtigkeit" und "Windgeschwindigkeit" war es möglicheinsehr grossen Prozentsatz der Streuung der 8 - 14 μ Infrarot-Strahlungstemperaturen der einzelnen Felder zu erklären. Die Einflüsse der Anbau-, Lage-, Expositions-, Wachstums- und Reifeparameter auf die erwähnten Faktoren - und damit auf die 8 - 14 μ Strahlungstemperaturen der Felder - konnten sehr detailliert erfasst werden. Die Verhaltensweisen der einzelnen Felder gegenüber jenen Einflüssen müssen bei der Anwendung von Infrarotsensoren im selben Spektralbereich stets berücksichtigt werden. Dies gilt vorerst, wenn im Testgebiet und Testzeitraum ähnliche Verhältnisse bezüglich der Vegetation wie im hier untersuchten Fall vorliegen. Es darf aber angenommen werden, dass der Gültigkeitsbereich der Aussagen auf die ganze Anbauperiode in vergleichbaren Klimabereichen ausgedehnt werden kann.

Aufgabenstellung und Genauigkeitsanforderungen sowie die Testanordnung müssen entscheiden, welche Messungen am Boden durchgeführt werden müssen, sodass bei der Auswertung der Daten optimale Resultate erreicht werden können.

1) Dieser Wert ist statistisch ungesichert, da nur 1 Maisfeld in die Messungen einbezogen werden konnte.

7. QUANTITATIVE AUSWERTUNG DER 3 - 5 μ DATEN

Wie erwähnt, handelt es sich bei 3 - 5 μ Tagaufnahmen nicht allein um Abbildungen thermaler Gegebenheiten, da bis ca. 4 μ der Anteil der direkt reflektierten Sonnenstrahlung stark einwirkt. Dadurch werden im allgemeinen sämtliche thermalen Effekte überstrahlt, wodurch ein den panchromatischen Aufnahmen ähnliches Bild entsteht. Von Thermographien kann man darum im eigentlichen Sinne nur bei Nachtaufnahmen sprechen. Die Tagaufnahmen werden deshalb nicht in die quantitativen Untersuchungen einbezogen.

Bei diesen Bildern ist ausserdem zu berücksichtigen, dass die spektralen Verteilungskurven von schwarzen Strahlern im Bereich 3 - 5 μ Strahlungsmaxima zwischen 600 und 900° K zeigen. Dies prädestiniert Scanner in diesem Spektralbereich zu bestimmten zivilen Aufgaben wie, geothermische Exploration, "Hot-Spot"-Detektion¹⁾ bei Gras- und Waldbränden, das flächenmässige Erfassen von unterirdisch brennenden Kohleminen etc. . .

Bei "normalen" Erdoberflächentemperaturen um ca. 290 - 300° K ist das Leistungsvermögen der Indium-Antimonid-Detektoren hingegen stark eingeschränkt, was sich bei den Nachtaufnahmen durch besonders flaue Kontrastwiedergabe auswirkt.

Zu dieser Schwierigkeit, bei dem geringen Dichteumfang auf den Bildern sichere Strahlungstemperaturen abzuleiten, kommt das Problem des AC/AGC-Scanners (s. Kap. 2.5.), der ein besonders dichtes Bodenkontrollnetz erfordert um letztlich quantitative Daten zu liefern.

Messprobleme bei den niedrigen Kontrastwerten auf den Filmen, die ihrerseits auch wieder durch die strahlungsphysikalischen Gesetze randliche Veränderungen erfuhren, sowie das Fehlen eines dichten Bodenmessnetzes über eine längere Zeitspanne, machten schliesslich eine zuverlässliche Auswertung der Nachtdaten unmöglich.

Resultate bei den 3 - 5 μ Daten und Bildstreifen können daher nur bei den verschiedenen Anwendungen gezeigt werden.

1) "Hot-Spot"-Detektion = Aufspüren von lokalen Hitzeherden.

8. EINIGE BEISPIELE ZUR ANWENDUNG DER INFRAROT-TECHNIK IM TESTGEBIET MAUENSEE

8.1. Versuch einer Trennung der landwirtschaftlichen Kulturen im Bereich 8 - 14 μ der Infrarot-Strahlung

Hier wird der Versuch unternommen, für bestimmte meteorologische Bedingungen zu prüfen, ob eine Trennung der Kulturen mit den vorliegenden Daten im 8 - 14 μ Bereich möglich und sinnvoll ist. Durch die schrittweise multiple Regression wurden für jedes Feld Funktionen gefunden, die es erlauben, die zu erwartenden Infrarot-Strahlungstemperaturen vorauszurechnen. (Beispiele s. Tab. 11, Kap. 6.4.3.2.). Obwohl diese mathematischen Operationen so ermutigende Resultate gezeitigt haben, bringt der erwähnte Versuch nicht die erwünschten Ergebnisse. In Fig. 44 bis 47 sind graphisch die Resultate solcher Berechnungen (mit Vertrauensgrenzen $\pm 1\sigma$) aufgezeichnet. Sehr deutlich lässt sich erkennen, dass die Streuung innerhalb der gleichen Kulturen oft grösser ist, als von einer Kultur zur anderen. Expositions- und Lageparameter beeinflussen die Strahlungstemperaturen viel stärker als erwartet. Die Beeinflussung der Verhaltensweisen der Felder durch Nachbarobjekte konnte im untersuchten Falle durch die Rechnung deutlich aufgezeigt werden. Wo aber diese lokalen Parameter nicht bekannt sind, dürfte ihre Abschätzung grosse Schwierigkeiten bieten.

Als Resultat kann zusammenfassend gesagt werden, dass mit den vorhandenen Mitteln, einem unkalibrierten Scanner im Bereich 8 - 14 μ , sich im Testgebiet unter den gegebenen phänologischen und meteorologischen Bedingungen keine Trennung der landwirtschaftlichen Kulturen durchführen lässt.

Im weiteren wird abgeklärt, ob der Bereich 3 - 5 μ , oder eine Kombination der beiden Bereiche eine Verbesserung der Resultate bringen kann (s. Kap. 8.2 und 8.3).

1) Bemerkungen zum Vertrauensbereich $\pm 1\sigma$

Bei einer Population von Messwerten, die in einer Normalverteilung angenähert werden können, sind bei $\pm 1\sigma$ ca. 68 % der Werte erfasst. Nimmt man $\pm 2\sigma$ als Bereich an, so werden ca. 95 % der Fälle innerhalb der Grenzen der Normalverteilung abgebildet.

Bei den Fig. 44 - 47 darf daher nicht erstaunen, dass einige gemessene Werte neben dem $\pm 1\sigma$ -Bereich liegen. Bei $\pm 2\sigma$ würden sie alle miteinbezogen.

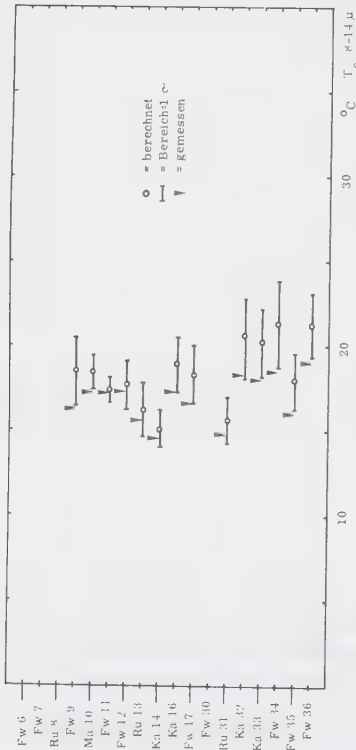


Fig. 44: Flug Nr. 11a vom 27.8.71, Zeit 13.54

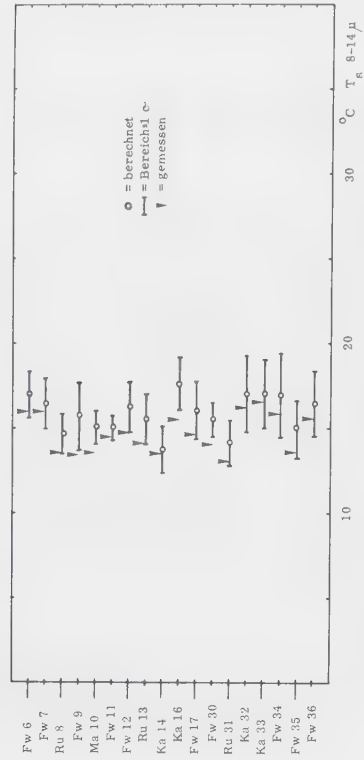


Fig. 45: Flug Nr. 12 vom 31.8.71, Zeit 14.46

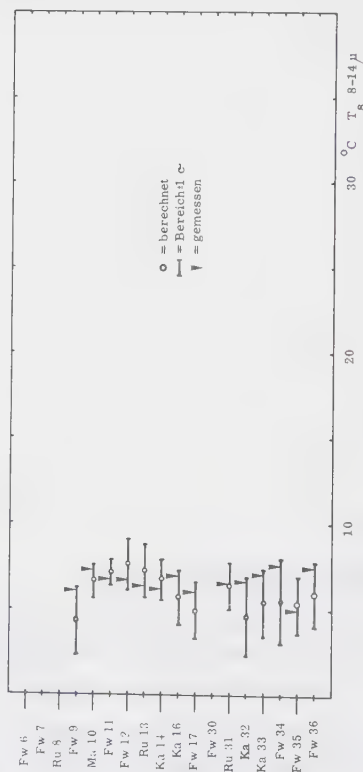


Fig. 46: Flug Nr. 13 vom 31.8.71, Zeit 20.13

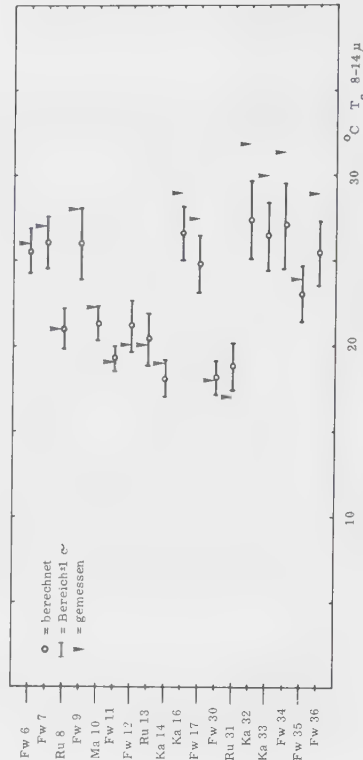


Fig. 47: Flug Nr. 16a vom 7.9.71, Zeit 14.35

Fig. 44 - 47: Aus einer optimalen Kombination der Meteovariablen berechnete $8-14 \mu$ - Strahlungstemperaturen (mit dem Vertrauensbereich $\pm 1c$) und die tatsächlich gemessenen Werte.

Vergleicht man bei Fig. 48 (Tagflug Nr. 21) und Fig. 49 (Nachtflug Nr. 22) die graphischen Darstellungen der berechneten mit den gemessenen Strahlungstemperaturen, um eventuelle systematische Fehler zu suchen, so fallen ganz besonders beim Tagflug das Nachbarverhalten, das sich gegenseitige Beeinflussen der Felder, auf. Deutlich wird auch hier noch einmal, wie schlecht eine allgemeine Kulturentrennung vorgenommen werden kann. Insbesondere beim Nachtflug (kurz nach Sonnenuntergang) sind die Unterschiede in den Strahlungstemperaturen der einzelnen Felder sehr klein geworden.

Beim Tagflug ist einzig das Kartoffelfeld Nr. 16 einigermaßen abgesetzt. Wie bereits früher erwähnt, stehen diese Kartoffeln kurz vor der Ernte - die oberen Pflanzenteile sind bereits verdorrt und der Boden bewirkt fast ungehindert die resultierende Strahlungstemperatur.

Fig. 48:

Graphischer Vergleich zwischen berechneten und gemessenen 8-14 μ Strahlungstemp. für den Tagflug Nr. 21 vom 14. 9. 71, Zeit 14.36 .
Ideallinie = gestrichelt

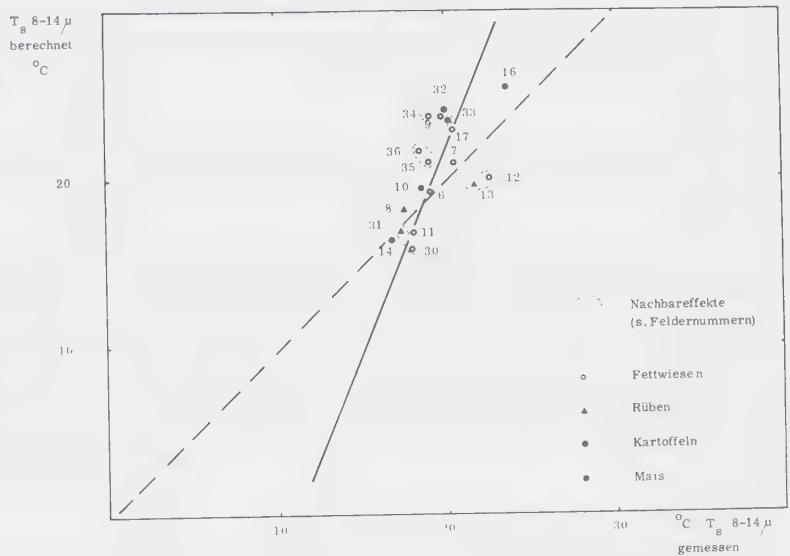
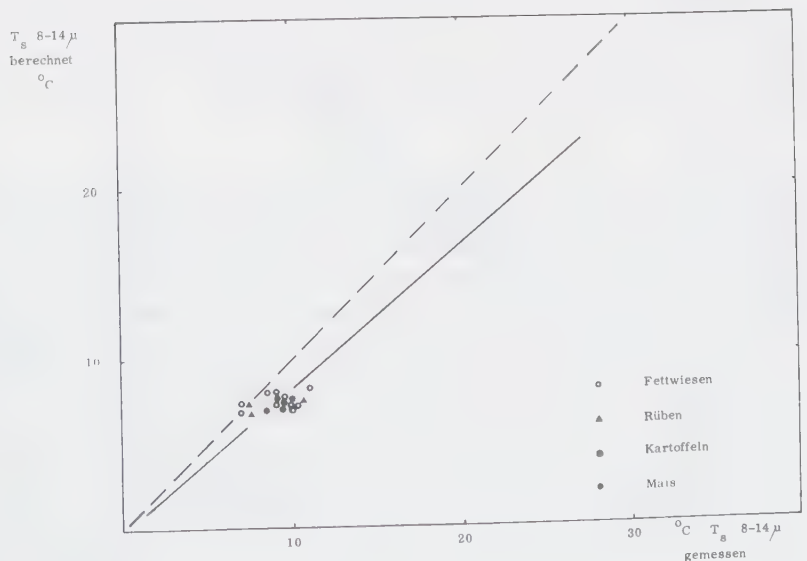


Fig. 49:

Graphischer Vergleich zwischen berechneten und gemessenen 8-14 μ Strahlungstemp. für den Nachtflug Nr. 22 vom 14. 9. 71, Zeit 19.38 .
Ideallinie = gestrichelt



In diesem Zusammenhang interessieren zwei zusätzliche Fragestellungen: Bei welchen Lufttemperaturen sind die 8 - 14 μ Strahlungstemperaturunterschiede am geringsten, und die umgekehrte Frage, bei welchen Lufttemperaturen die Strahlungstemperaturunterschiede am grössten seien. Die letztere ist leichter zu beantworten, da höhere Umgebungstemperaturen durch Einstrahlung grössere Strahlungstemperatur-Differenzen bewirken.

Betrachtet man die berechneten Regressionsgeraden aller Felder in der Gegenüberstellung: Strahlungstemperatur zu Lufttemperatur (s. Fig. 50), so fällt auf, wie im Bereich zwischen 8 - 10° C Lufttemperatur sich fast alle Regressionsgeraden überschneiden. Somit kann gesagt werden, dass im untersuchten Zeitraum, bei Lufttemperaturen zwischen 8 und 10° C, die geringsten Möglichkeiten einer Unterscheidung der verschiedenen Felder durch ihre 8 - 14 μ Strahlungstemperatur gegeben ist. Eine Erklärung für diesen Temperaturbereich ist relativ einfach: Er fällt genau in die Uebergangszeit zwischen Einstrahlung mit Reflexion + Emission und reiner Emission ohne weitere Einstrahlung um den Sonnenuntergang !

Eine weitergehende Feststellung zu diesem Resultat ist relativ schwierig und spekulativ, da erst Untersuchungen zu anderen Jahreszeiten diese Frage endgültig klären können. Immerhin liegt die Vermutung nahe, dass die Strahlungstemperaturunterschiede natürlicher ungestörter Vegetationsflächen ein erstes Minimum im Zeitraum um den Sonnenuntergang haben.

Aus der genannten Graphik (Fig. 50) kann auch der eindeutige Schluss gezogen werden, dass höhere Temperaturen bessere Trennmöglichkeiten der Felder bringen.

Das gleiche Problem auf den Faktor "rel. Luftfeuchtigkeit" angewandt, zeigt in der Darstellung aller Regressionsgeraden, dass mit abnehmender Feuchtigkeit die 8 - 14 μ Strahlungstemperaturunterschiede zwischen den einzelnen Feldern zunehmen (Fig. 51). Da die beiden Faktoren "Lufttemperatur" und "rel. Luftfeuchtigkeit" linear stark negativ korrelieren, ist dieses Resultat einfach zu erklären: Der Ueberkreuzungsbereich der Regressionsgeraden liegt zwischen 90 und 100 % rel. Luftfeuchtigkeit und fällt damit in der Untersuchungsperiode in die Zeit nach Sonnenuntergang (Ausnahme bei Tagesniederschlägen). Ist dieser Bereich abends einmal erreicht, so bleibt er unter normalen Wetterbedingungen bis zum Sonnenaufgang bestehen.

Fig. 52 zeigt die Zusammenstellung aller linearen Regressionsgeraden der spezifischen Luftfeuchtigkeit gegenüber der 8 - 14 μ Strahlungstemperatur. Mit einer Zunahme der spez. Luftfeuchtigkeit nimmt die Unterscheidbarkeit der verschiedenen Felder zu, da die 8 - 14 μ Strahlungsunterschiede grösser werden. In einem Bereich zwischen 5 und 9 gr H₂O/m³ (Lufttemperaturen von 0° bis ca. 9,5° C) sind die Geraden noch schlecht getrennt. Einer Zunahme der spez. Luftfeuchtigkeit entspricht eine nicht-lineare Zunahme der Temperatur. Damit kann die Ähnlichkeit zu Fig. 50 erklärt werden.

Fig. 53 enthält die Zusammenfassung aller linearen Regressionsgeraden der Beziehungen zwischen der Windgeschwindigkeit und der 8 - 14 μ Strahlungstemperatur. Interessanterweise verbessert sich die Unterscheidbarkeit der einzelnen Felder bei zunehmender Windgeschwindigkeit im untersuchten Bereich bis Geschwindigkeiten von 6m/sec. Colwell und Olson 1966, kommen zum gleichen Resultat mit Windgeschwindigkeiten bis zu 3 Meilen/Std. und erklären es folgendermassen: Bei Windstille wird die Temperatur durch die Transpiration der Blätter und nur zu einem geringen Teil durch Konvektion beeinflusst, während bei Wind die Temperaturbeeinflussung durch "forcierte Konvektion" in viel grösserem Masse in Erscheinung tritt. Lorenz 1971 sagt, dass im Falle von Windstille die Strahlungstemperaturen zufällig und lokal schwanken, während er vermutet, dass bei Wind die wesentlichen Unterschiede in den Temperaturen der verschiedenen Vegetations-Oberflächen klarer hervortreten würden. Diese Theorien finden hiermit ihre Bestätigung. Abzuklären wäre allerdings noch, bei welchen Windgeschwindigkeiten die thermalen Unterschiede schliesslich ausgeglichen würden und dann eine Unterscheidbarkeit nur noch auf Oberflächen- und Emissions-Unterschieden beruhen kann.

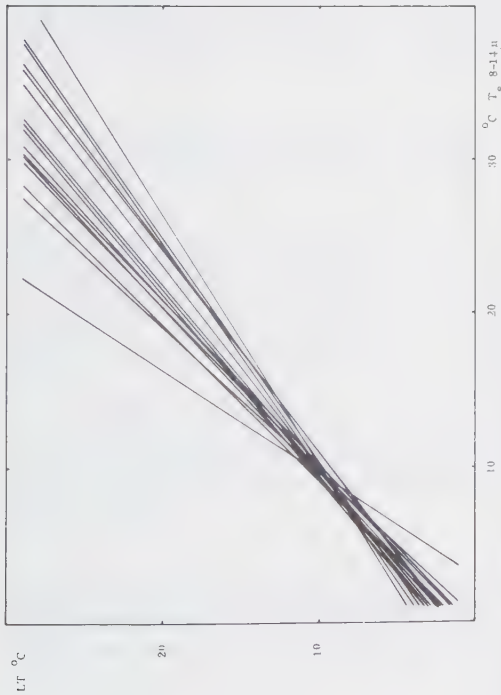


Fig. 50: Lufttemperatur (LT) : 8-14 μ Strahlungstemp. (T_s) Fig. 51: rel. Luftfeuchtigkeit (rel. F) : 8-14 μ Strahlungstemp. (T_s)

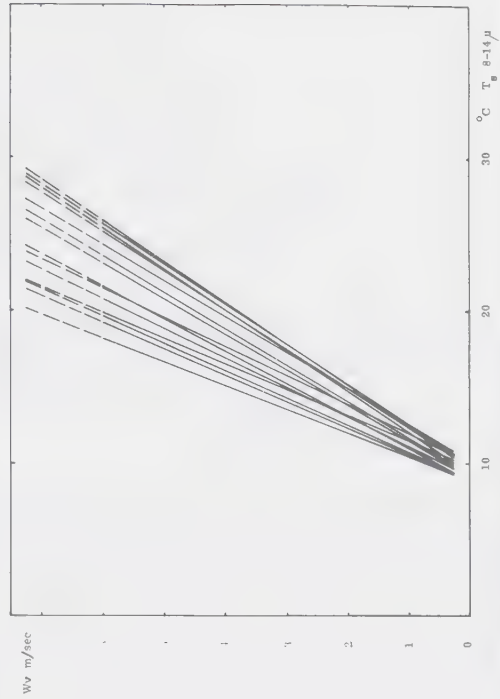
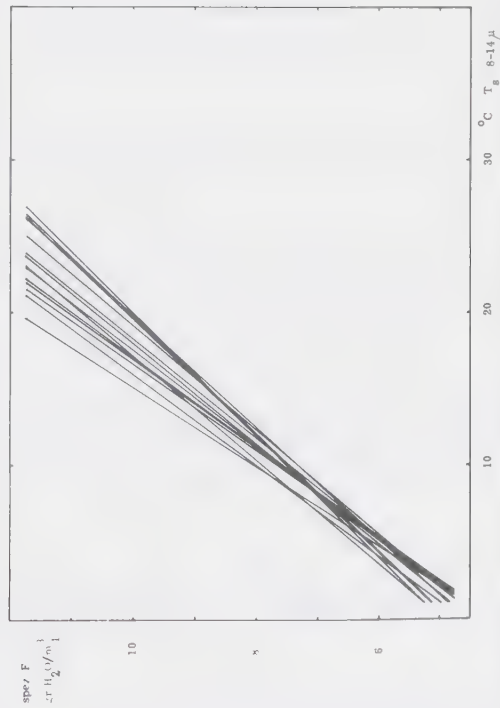


Fig. 52: spez. Luftfeuchtigkeit (spez. F) : 8-14 μ Strahlungstemp. (T_s) Fig. 53: Windgeschwindigkeit (Wv) : 8-14 μ Strahlungstemp. (T_s)
Fig. 50 - 53: Die Regressionsgeraden aller Felder gemessen über 15 Flüge, der linearen Beziehungen zwischen den einzelnen
Meteovariablen und der 8-14 μ Strahlungstemperatur von Vegetationsflächen.

8.2. Versuch einer Trennung der landwirtschaftlichen Kulturen im Bereich 3 - 5 μ der Infrarot-Strahlung

Dieser Versuch musste sich auf sehr wenige Daten stützen, da nur bei 3 Ueberflügen die Dichtedaten der Filme des Reconofax-Scanners mit den Ardonox-Bodenmessungen sinnvoll korrelieren.

Fig. 54 (Flug 21) zeigt die Gegenüberstellung der Flug- und Bodenmesswerte für einen Tagflug. Die Feldmessungen mit dem Ardonox Strahlungsthermometer werden in einem Winkel von 45° zu den Vegetationsoberflächen durchgeführt, um bei dem rel. engen Gesichtsfeld zu vermeiden, dass der Erdboden zwischen den Pflanzen gemessen wird.

Offensichtlich führte der vermehrte Einfluss der Reflexion der Sonnenstrahlung beim Scanner gegenüber dem Ardonox zu dem relativ steilen Anstieg der Scannerwerte. Die wenigen verwendbaren Vergleichsflächen ermöglichen keine Aussage über die Trennbarkeit. Darum sind in Fig. 55 Mikrodensitometerprofile mit relativen Filmdichtewerten für zwei Tagflüge und einen Nachtflug graphisch dargestellt. Wegen der automatischen Bereichsumschaltung (AGC) dürfen die einzelnen Profile nicht quantitativ miteinander verglichen werden. Sie geben nur einen Eindruck von den erzielbaren Kontrastverhältnissen.

Zwischen den Flügen 10 und 12 wurde das Stoppelfeld "Fettwiese 34" (ehemals Hafer) umgepflügt, was die abrupte Dichteänderung (Änderung der Reflexionseigenschaften) erklärt.

Beim Nachtflug lassen sich die beiden Teilprofile 6 - 17 und 30 - 36 nicht gut aneinanderreihen, da durch Querlage des Flugzeuges während der Aufnahme eine Verlagerung der Strahlungstemperaturwerte (Dichtewerte) eintrat. Solche Fehler können nur bei sehr dichtem Bodenkontrollnetz in der Auswertung korrigiert werden.

Mangels geeigneter Daten kann eine abschliessende Beurteilung der Frage der Kulturentrennung nicht vorgenommen werden. Es ist aber zu vermuten, dass der Bereich der reflektierten Sonnenstrahlung (bis 4 μ) mehr zur Lösung dieses Problems beitragen kann als der thermale Bereich.

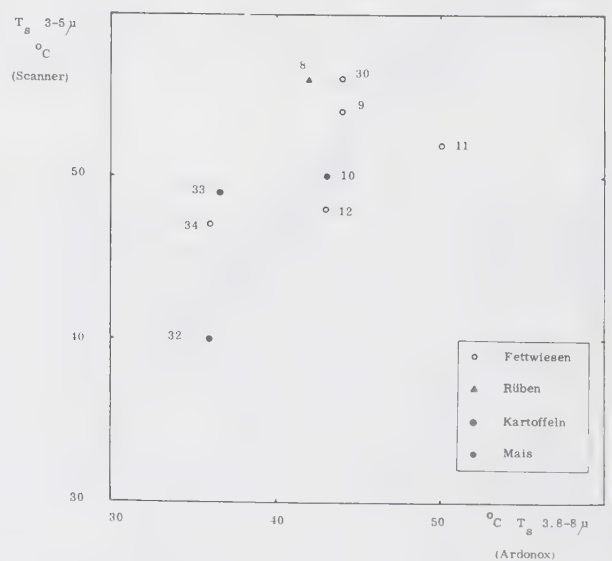
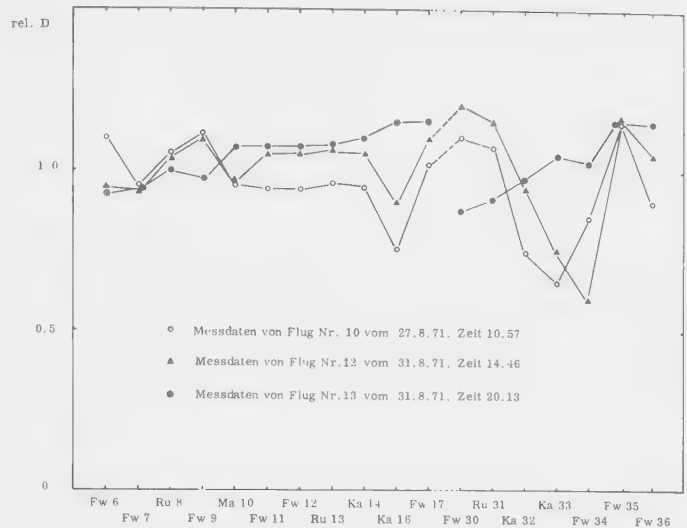


Fig. 54: Gegenüberstellung der 3-5 μ Strahlungstemp. und den 3.8-8 μ Ardonox Bodenmessungen, Flug Nr. 21 vom 14.9.71, Zeit 14.36

Fig. 55: Vergleich von 3-5 μ Mikrodensitometer-Profilen mit relativen Dichtewerten für 2 Tagflüge (Nr. 10a vom 27.8.71, Zeit 10.57 und Nr. 12a vom 31.8.71, Zeit 14.46) und einem Nachtflug (Nr. 13 vom 31.8.71, Zeit 20.13).



8.3. Versuch einer Trennung der landwirtschaftlichen Kulturen durch die Kombination von 3 - 5 μ und 8 - 14 μ Strahlungstemperaturdaten.

Der Versuch, durch eine Kombination der Messdaten der beiden Infrarotbereiche eine Verbesserung der Trennung herbeizuführen, zeigte keine guten Ergebnisse. Insbesondere die grosse Streuung bei den Fettwiesen sowohl im Emissions- als auch im Reflexionsbereich verunmöglichte eine deutliche Unterscheidbarkeit der verschiedenen Kulturen.

8.4. Zusammenhang zwischen Bodenfeuchtigkeit und Infrarot-Strahlungstemperatur unbewachsener Böden.

Während 3 Flügen (ein Tag- und zwei Nachtflüge) wurden simultan an 9 vorausbestimmten Stellen Bodenproben¹⁾ für die Bestimmung der Bodenfeuchtigkeit entnommen. Die durch Gewichtsverlust beim Trocknen der Proben²⁾ ermittelten prozentualen Bodenfeuchtigkeiten sollten statistisch mit den kalibrierten 8 - 14 μ Scannermessungen verglichen werden.

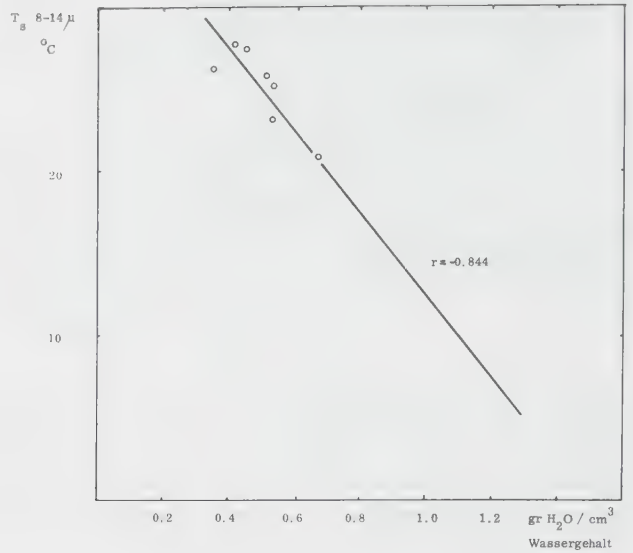
Beim Tagflug (Nr. 21) konnte keine Korrelation entdeckt werden, da offenbar durch die direkte Einstrahlung der Sonne und die Erwärmung der obersten Bodenschicht eine relative Oberflächen-austrocknung stattfand, die im Gegensatz zum Feuchtigkeitsgehalt der Bodenproben der obersten 5 cm stand.

Auch beim ersten Nachtflug (Nr. 22) um 19.38 Uhr, kurz nach Sonnenuntergang, war noch keine nennenswerte Korrelation festzustellen. Das natürliche Feuchtigkeitsgefüge ohne Einstrahlung hatte sich noch nicht einstellen können.

1) Probenentnahme der obersten 5 cm des Bodens durch Glassonde

2) Bodenprobentrocknung bei 105°C

Fig. 56: Zusammenhang zwischen Bodenfeuchtigkeit und 8-14 μ Strahlungstemperatur unbewachsener Böden, Flug Nr. 23 vom 14. 9. 71, Zeit 21. 24 .



Beim zweiten Nachtflug (Nr. 23) um 21.24 Uhr zeigte sich erstmals mit einem Korrelationskoeffizienten von -0.844 ein Anzeichen für eine gewisse Abhängigkeit (s. Fig. 56). Wie zu erwarten, ist höheren Strahlungstemperaturen geringere Bodenfeuchtigkeit und umgekehrt zuzuordnen.

Der Korrelationskoeffizient ist vermutlich deshalb so niedrig, weil nicht alle AGC-Effekte und Randerscheinungen eliminiert werden konnten. Die walddahen Testfelder haben gestörte Strahlungstemperaturen und mussten darum in der Rechnung weggelassen werden.

Mit dem erwähnten Test sollte der Versuch unternommen werden, eine bereits etablierte Anwendung von Infrarot-Sensoren nachzuvollziehen. Das Resultat darf aber wegen der statistisch kleinen Anzahl von Messungen nicht quantitativ weiterverwendet werden.

Die Beziehung zwischen 3 - 5 μ Strahlungstemperaturen und der Bodenfeuchtigkeit scheiterte am äusserst geringen Kontrastumfang beim Film des 2. Nachtflugs, der eine sichere Zuordnung von Dichtewerten zu den Bodenmessungen nicht zuliess.

9. BEISPIELE VON WEITEREN ANWENDUNGEN DER INFRAROT-TECHNIK BEI GEOGRAPHISCHEN UNTERSUCHUNGEN

9.1. Der Kontakt von Wassermassen unterschiedlicher Temperatur

Untersuchungen unserer Seen haben in vielen Fällen gezeigt, dass die Vermischung von einfließendem Flusswasser mit dem Seewasser äusserst gering ist. Am Beispiel Bodensee konnte festgestellt werden, dass das einfließende Rheinwasser den See in einem eigentlichen Strom durchquert. Man kann mit Tiefenprofilmessungen der Wassertemperaturen quer über den See den Verlauf dieses "Rheinstromes" sehr gut verfolgen¹⁾. In der Tiefe pendelt er sich je nach Temperatur und Wasserdichte in bestimmten Niveaus ein. Normalerweise taucht das kühle Flusswasser als mehr oder weniger kompakte Masse schon kurz nach der Mündung ab. Interessant für den Hydrologen ist besonders dieser Abtauchbereich, der sich in seiner örtlichen Lage und Ausbreitung ständig verändert und wichtige Anhaltspunkte über die Durchmischung im Mündungsbereich ergibt. An Ort und Stelle können jeweils nur gewisse örtlich begrenzte Aussagen gemacht werden, mit Hilfe des Thermalscanners lassen sich hingegen die örtlichen und zeitlichen Veränderungen gut festhalten. Mit einem solchen Gerät können Wasseroberflächentemperaturen flächenhaft erfasst werden. Dieses Mittel macht die Bodenkontrolle nicht etwa unnötig. Im Gegenteil, diese ist auch hier unumgänglich, nur dass sie optimal an der richtigen Stelle erfolgen kann, wobei durch eine geschickte Kombination und Auswahl der Bodenmesspunkte nachher eine Kartierung der Oberflächentemperaturen möglich ist.

Warum interessiert gerade diese Durchmischung im Mündungsbereich so sehr? Als bekanntes Beispiel kann wieder der Bodensee dienen. Als Effekt der schlechten Durchmischung des Rheinwassers mit dem Seewasser, dauert es in der anschliessenden Bregenzerbucht ca. 2 Jahre bis das Wasser wieder total erneuert ist.

In dieser Arbeit soll nicht weiter auf Probleme der Hydrodynamik und Hydrologie eingegangen werden. Es scheint mir aber notwendig und wichtig, dass vor allem hydrologische Forschungsstellen, Umwelt- und Gewässerschutzämter mit den Möglichkeiten der Ueberwachung der Gewässer aus der Luft mit Infrarot-Thermalscannern vertraut werden.

Der Einsatz von unkalibrierten militärischen Scannern erschwert auch hier selbstverständlich die Interpretation, doch lassen sich die prinzipiellen Anwendungsmöglichkeiten ebenso gut mit diesen Geräten zeigen.

Bei Infrarot-Messungen von Wasseroberflächen im Bereich $8 - 14 \mu$ kann von Oberflächentemperaturen gesprochen werden, da bei Wassermassen unterschiedlicher Temperatur der Emissionsfaktor nahezu konstant bleibt. Die empfangenen Strahlungsdifferenzen sind daher direkt proportional zu den Oberflächentemperaturen. Für eine absolute Messung ist auch hier die Bodenkontrolle unerlässlich. Bei absolut kalibrierten Geräten kann darauf in gewissem Sinne verzichtet werden. Wie bereits früher erwähnt, ist aber die Kenntnis der zu erwartenden Oberflächentemperaturen und deren Unterschiede für die optimale Einstellung der quantitativen Scanner wichtig.

1) Exkursion mit Prof. Dr. J. Ulrich (Inst. f. Meereskunde, Kiel) unter der Leitung des "Staatlichen Instituts für Seenforschung und Seenbewirtschaftung", Konstanz.

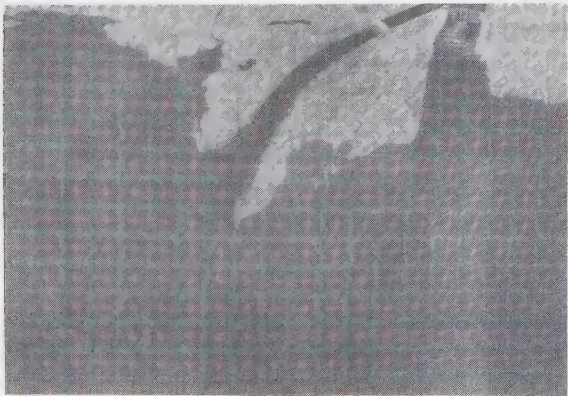
Der Begriff "Oberflächentemperatur" ist in diesem Zusammenhang wörtlich zu nehmen, sind es doch die Temperaturen des obersten Zehntelmillimeters des Wassers, die gemessen werden. Wegen der fast totalen Absorption von Infrarot-Strahlung durch H_2O , kann ein Körper unter Wasser nicht direkt durch Infrarot-Strahlung an der Wasseroberfläche entdeckt werden. Dies schliesst allerdings nicht aus, dass sich die Temperatur des Körpers durch Wärmeübertragung an der Wasseroberfläche manifestiert und indirekt erfasst werden kann (z. B. bei Algenteppichen). Damit spielen oberflächliche Temperaturschwankungen z. B. durch Windböen, Strömung etc. sofort eine wichtige Rolle.

Dies bedeutet, dass man sich bei Untersuchungen von Strömungsverhältnissen kalter Wassermassen in einem See vorab auf den Mündungsbereich beschränken muss, da das kalte Wasser mit seinem spezifisch höheren Gewicht bald abtaucht und nur in vereinzelten Fällen in seichten Gewässern wieder an der Oberfläche durch Strömung auftauchen oder durch Wärmeübertragung manifest werden kann.

Im folgenden sollen anhand von Bildbeispielen diese speziellen Möglichkeiten der Thermal-scanner demonstriert werden.

9.1.1. Das Einfließen der Aare in den Bielersee bei Hagneck (Fig. 57)

Sehr deutlich kann beim 8 - 14 μ Bild im Mündungsbereich das kühle (dunkle) Aarewasser mit einer durchschnittlichen Temperatur von 18° C vom wärmeren Bielerseewasser (23½° C) unterschieden werden. Die Thermographie lässt eindeutige Schlüsse über das Einströmverhalten des Flusses zu. Das Aarewasser taucht wegen seiner grösseren spezifischen Dichte sehr schnell als kompakter Wasserkörper im Seewasser ab.



3-5 μ



8-14 μ

Fig. 57: Einfließen der Aare in den Bielersee bei Hagneck, Flug Nr. 6 vom 19.8.71, Zeit 14.30
Orientierung: Aarelauf links, Hagneck-Kanal rechts, Seeufer = oben = Ost, Bielersee unten.

Das Bild gibt insbesondere Aufschluss über die randlichen Durchmischungszonen. Mischungstemperaturen können auf jenen Abtastlinien densitometrisch bestimmt werden, auf denen beide Wasserkörper, Seewasser und Flusswasser, abgebildet sind, da sich Zwischenwerte linear berechnen lassen. Eine flächenhafte Erfassung der Oberflächentemperaturen stösst hingegen wegen den AGC-Umschaltungen auf Schwierigkeiten. Der Versuch, das Bild mit Hilfe eines Bildabtast- und Dichtentrenngeräts¹⁾ zu verdeutlichen, gelang insofern nicht, weil das menschliche Auge auch über Umschaltgrenzen hinaus den Verlauf des Wasserkörpers verfolgen kann, während ein Automat die Grenzen dort setzt, wo sie durch Dichtegrenzwerte vorher eingegeben worden sind.

Der Uferbereich wird im $3 - 5 \mu$ Bereich besonders gut abgebildet, ohne aber Details in bezug auf die Temperaturverhältnisse zu zeigen. Das Einstromverhalten des Flusses wird in diesem Bereich nur sehr schwach dargestellt, da das thermisch bedingte Signal durch Reflexion von Sonnenstrahlung überdeckt wird.

Bei der $8 - 14 \mu$ Thermographie wird der Uferbereich wegen Abtastunsymmetrien relativ schlecht abgebildet.

9.1.2. Das Einfließen der Linth in den Zürcher-Obersee (Fig. 58)

Die Beispiele zeigen das Einstromverhalten der Linth in 3 aufeinanderfolgenden Sequenzen. Bildpaar 1 stellt die Situation bei einem Tagflug (Zeit: 14.38) dar, während die beiden folgenden die Gegebenheiten in der darauffolgenden Nacht zeigen (20.05 resp. 21.38).

Im ersten Bildpaar gelten mehr oder weniger die gleichen Aussagen über die Erkennbarkeit wie schon beim Aarebild, nur dass hier infolge des Seegrunds ein ganz anderes Einstromverhalten auftritt.

Nachtaufnahmen des gleichen Objekts wurden vorgenommen, um einerseits die Leistungsfähigkeit beider Scanner bei Nacht zu untersuchen und andererseits einen Einblick in kurzfristige Veränderungen im Einfließverhalten zu gewinnen.

Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit fällt sofort auf, dass die Wasserkörper unterschiedlicher Temperatur in den Nachtflügen auch im Bereich $3 - 5 \mu$ erkennbar sind, da dann die reine thermal emittierte Strahlung wirkt. Der $8 - 14 \mu$ Bereich ist aber auch unter diesen Umständen überlegen.

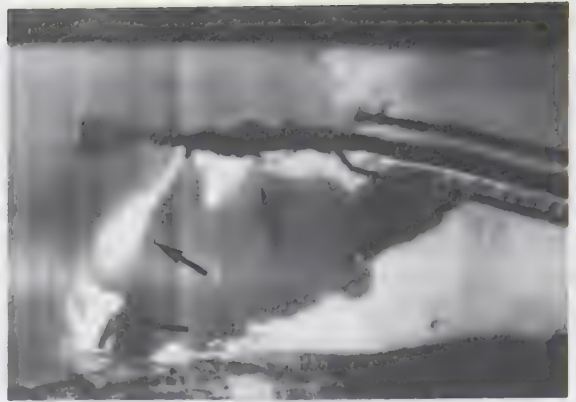
Die Wassertemperaturen betrugen für das kalte Linthwasser und das relativ warme Seewasser: 14° resp. $19\frac{1}{2}^{\circ}$ bei Flug 12, sowie $13\frac{1}{2}^{\circ}$ resp. 19° C bei den Flügen 13 und 14.

Im Einstromverhalten zeigen sich deutliche Differenzen zwischen den einzelnen Bildern, die auf unterschiedliche Wasserführung und Strömungsgeschwindigkeit zurückgeführt werden können.

1) Dieses Gerät umfasste folgende Komponenten: Einen konventionellen Trommel-Bildabtaster, eine Analog-Digital-Wandler, einen Rechner, einen Digital-Analog-Wandler und ein gebräuchliches Bildwiedergabegerät. Dr. G. Kritikos (Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, BRD) hat freundlicherweise den Versuch durchgeführt.

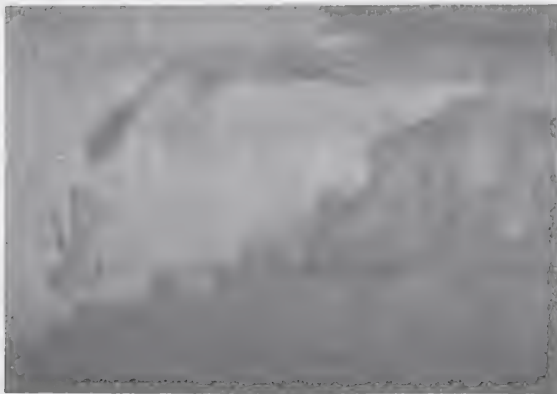


3-5 μ

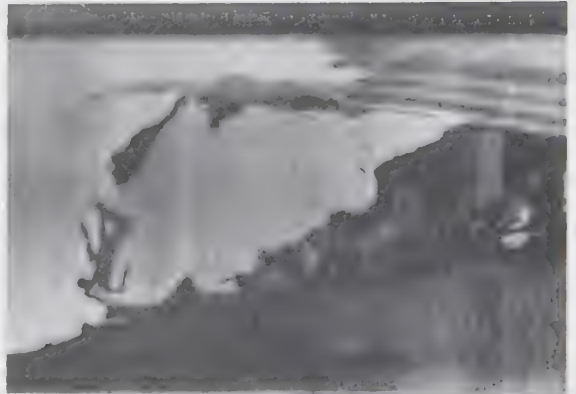


8-14 μ

Flug Nr. 12 vom 31.8.71, Zeit 14.38



3-5 μ



8-14 μ

Flug Nr. 13 vom 31.8.71, Zeit 20.05



3-5 μ



8-14 μ

Flug Nr. 14 vom 31.8.71, Zeit 21.38

Fig. 58:

Einfließen der Linth in den Zürich-Obersee, Flüge Nr. 12, 13 und 14 vom 31.8.71, Zeiten: 14.38, 20.05 und 21.38 .

Orientierung: Linth mit den beiden Seitenkanälen von rechts nach links, in Bildmitte (s. Pfeile) Inseln.

Besonders beim 8 - 14 μ Bild des Tagfluges wird ein Verhalten erkennbar, das schon bei anderen Seen beobachtet wurde: Das kühle Linthwasser taucht sehr früh ab, trifft auf den wenig tiefen Seeboden, wird dort reflektiert, wieder zur Wasseroberfläche abgelenkt und sinkt schliesslich wieder ab. Je nach Strömungsgeschwindigkeit und Seegrundverhältnissen kann das einflussende Gewässer dieses Absinken und Ansteigen (eine Art Wellenbewegung) mehrere Male hintereinander zeigen. Bei den Nachtflügen sind die entsprechenden Vorgänge weniger deutlich erkennbar.

Sehr schön sind die Positiv-Negativ-Effekte von Land zu Wasser bei Tag und Nacht zu sehen. Während sich generell das Land am Tage schneller aufheizt, das Wasser aber kühler bleibt, stellt das Wasser nachts gegenüber der kühlen Landmasse ein "Wärmereservoir" dar. Die kleinen langgestreckten Inseln im Einflussbereich zeigen diesen Kontrast besonders deutlich.

9.1.3. Thermale Gewässerbelastung durch das Kühlwasser eines Kernkraftwerkes (Fig. 59)

In der 8 - 14 μ Thermalaufnahme der Aare bei Beznau kann das Strömungsverhalten des erwärmten "Kühlwassers" im Aarelauf gut verfolgt werden. Die Warmwasserfahne ist flussabwärts über ca. 4 km bis zur Mündung in den Klingnauer-Stausee gut zu erkennen. Die Durchmischung der beiden unterschiedlichen Wasserkörper vollzieht sich somit über eine längere Distanz. Im Bereich direkt unterhalb des Kraftwerkes ist eine Durchmischung sogar unerwünscht. Durch Zuleitung von Aarewasser aus dem Wehr (A) wird verhindert, dass das erwärmte Kühlwasser in die Grundwasser-Infiltrationszone (C) gelangen kann. Ausserdem ist damit den Fischen eine Möglichkeit gegeben, das warme Kühlwasser zu meiden und im kühlen Aarewasser diesen Bereich zu passieren.

Thermalaufnahmen sind somit geeignet, solche Schutz-Massnahmen zu überprüfen und zu kontrollieren.

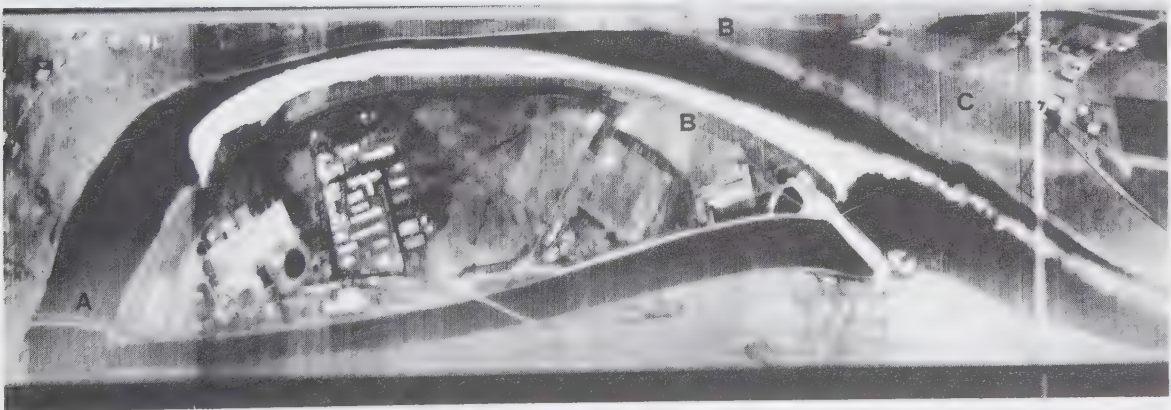


Fig. 59: 8-14 μ Thermalaufnahme der Kühlwasser-Mündung in der Aare beim Kernkraftwerk Beznau, Flug vom 25.3.71, Zeit 09.10.

A = Wehr

B-B = Profil über die Aare (s. Text)

C = Infiltrationszone von Aarewasser in das Grundwasser
(Trinkwasserversorgungsgebiet)

Am Aufnahmedatum war nur Werk I (im Bild links) in Betrieb. Deutlich sind das wärmere Reaktorgebäude und die im Betrieb warmen Transformatoren abgebildet. Werk II befindet sich noch im Bauzustand.

Das Kühlwasser der Aare tritt im Bildbeispiel mit einer Temperatur von 4.7°C in den Kühlvorgang ein und verlässt das Werk mit 14.2°C im Auslaufkanal. Im Bereich dieses Kühlwasserauslaufes beträgt der Unterschied zwischen den zwei abgebildeten Wassermassen also 9.5°C . Bei einer Profilmessung über den Fluss bei B ergaben sich noch Werte von 10.2°C für das erwärmte Kühlwasser und 5.2°C für das Aarewasser. Ca. 4 km flussabwärts bei der Brücke von Kleindöttingen betrugen diese Werte noch 5.5°C resp. 4.2°C ¹⁾.

Die Erwärmung des Wassers stellt für das ökologische Gleichgewicht im Fluss ein schwerwiegendes Problem dar. Die Voraussetzungen für Untersuchungen der Beeinflussung sind durch äusserst präzise Messvorschriften und Kontrollen der kurzzeitlichen und langzeitlichen Veränderungen in Temperaturen, Chemismus und Radioaktivität des Aarewassers und des Grundwassers in der weiteren Umgebung gegeben.

Zu den permanenten Messungen gehören die laufende Registrierung der Ein- und Austrittstemperatur des Wassers sowie der Durchflussmenge. Alle 14 Tage werden periodisch Grundwassertemperaturen an 40 Stellen in verschiedenen Tiefen mit fest eingebauten Sonden vorgenommen. Alle Trinkwasserfassungen der weiteren Umgebung werden dabei ebenfalls untersucht. Überprüfung des Chemismus und der Radioaktivität werden periodisch vorgenommen. Da mit diesen Messungen schon 3 Jahre vor Inbetriebnahme des Werkes begonnen wurde, steht bereits eine grosse Messerie zur Verfügung.

Dieses Kapitel wurde deshalb etwas ausführlicher behandelt, weil es mir notwendig erscheint zu betonen, dass es Umwelteinflüsse durch thermische Kernkraftwerke gibt, dass man aber von Seiten der Behörden, des Werkbetreibers und der Werksleitung durch die erwähnten Massnahmen und Untersuchungen bestrebt ist, alle möglichen Risiken zu vermeiden und die ökologischen Einflüsse unter Kontrolle zu halten. Dabei können, wie gezeigt, Infrarot-Thermalaufnahmen insbesondere im Bereich $8 - 14\mu$ ein wertvolles Hilfsmittel darstellen.

9.2. Allgemeine Gewässerüberwachung

Immer häufiger stellt sich das Problem, Art, Ursprung und Ausmass plötzlich auftretender Gewässerverschmutzungen festzustellen. In fast allen Fällen unterscheiden sich diese Verschmutzungen, seien sie im Wasser in ungelöster, gelöster oder suspendierter Form vorhanden, einerseits durch eine andere Temperatur als das Wasser oder durch einen anderen Emissionsfaktor. Sie sind darum in den meisten Fällen mit Thermalscannern detektierbar.

Einerseits kann die flächenmässige Ausdehnung der Verschmutzung erfasst werden, sodass die Proben genau an den richtigen Stellen genommen werden und die anschliessenden Gegenmassnahmen gezielt erfolgen können. Andererseits ist der Ursprung der Verunreinigung wichtig, um beispielsweise einen Defekt zu beheben oder die Verursacher zur Verantwortung ziehen zu können.

Die Art der Verschmutzung festzustellen, dürfte in den meisten Fällen Sache von Probenuntersuchungen sein, da die spektralen Signaturen eines oder zweier Bandbereiche sicher nicht ausreichen, um diese Frage mit genügender Genauigkeit klären zu können.²⁾

1) gemäss Werksmessungen

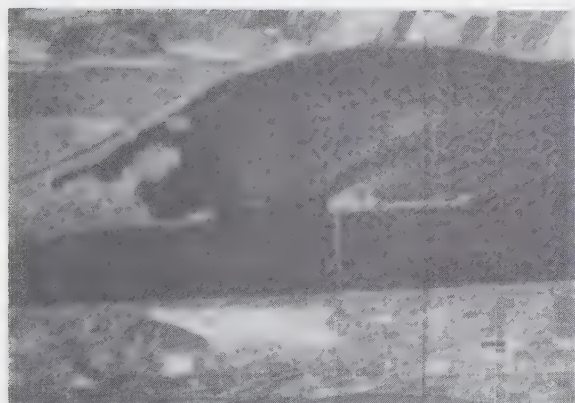
2) Diese Fragestellungen werden gegenwärtig besonders in den Vereinigten Staaten mit sogenannten Multispektral-Scannern, mit denen gleichzeitig in bis zu 24 verschiedenen Bandbereichen Aufnahmen gemacht werden können, untersucht.

9.2.1. Gewässerüberwachung am Beispiel Klingnauer Stausee (Fig. 60)

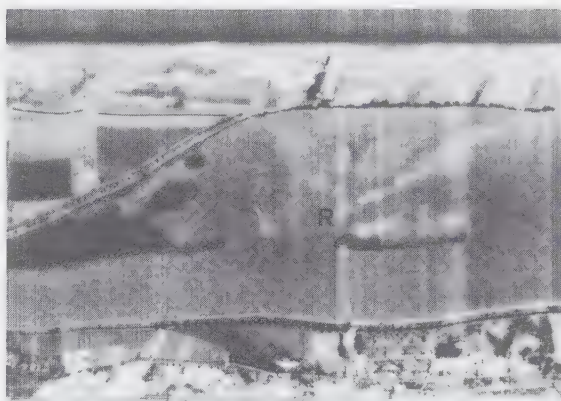
Die Bildausschnitte in Fig. 60 zeigen das obere Ende des Klingnauer Stausees. Im Bereich 3 - 5 μ werden seichte Stellen auf der Höhe der Inseln sichtbar. Die Rinne in Bildmitte stellt einen ehemaligen Altwasserlauf der Aare dar.

Auch hier ist besonders die 8 - 14 μ Darstellung aufschlussreich. Neben den Untiefen, die durch Wärmeübertragung des nur von wenig Wasser überdeckten Seegrundes erkennbar sind, werden auch offensichtliche Verschmutzungen deutlich (s. Pfeil). Aufgrund eines solchen Bildes müssten an Ort und Stelle sofort Wasserproben entnommen werden.

Der Klingnauer Stausee ist als Untersuchungsobjekt auch deshalb von besonderem Interesse, da er noch im unmittelbaren Bereich des mit Flusswasser gekühlten Kernkraftwerkes Beznau liegt und sein thermales Regime durch das künstlich erwärmte Aarewasser direkt beeinflusst wird.



3-5 μ



8-14 μ

Fig. 60: Gewässerüberwachung am Beispiel Klingnauer-Stausee, Flug Nr.7 vom 24.8.71, Zeit 14.26.

Orientierung: im Bild links = Mündung der Aare, unten = Klingnau, in der Bildmitte Insel, R = ehemal. Altwasserlauf, Pfeil s. Verschmutzung.

9.2.2 Gewässerüberwachung am Beispiel Bodensee (Fig. 61)

Die Bildbeispiele in Fig. 61 zeigen einen Ausschnitt des Bodenseeufers im Raum Kesswil-Güttingen (TG). Es sind keine direkten Verschmutzungen zu erkennen, dafür aber einige interessante Erscheinungen erwähnenswert.

Im 8 - 14 μ Bild, das die Temperaturverhältnisse der Wasseroberfläche wiedergibt, sind 2 Bacheinläufe abgebildet. Das kühlere Bachwasser ist deutlich erkennbar. Oft treten Gewässerverschmutzungen erstmals an solchen Stellen zutage. Auch Rohrleitungen, die von Fabriken direkt ins Wasser münden, oder Kanalisationen der Gemeinden, sind meistens erkennbar. Den Tiefbau- und Gewässerschutzämtern ist damit ein Mittel in die Hand gegeben, eine genaue Statistik über Bach und Abwässermündungen vorzunehmen.

Das Mittel der Thermalaufnahme bietet die Möglichkeit, bei auftretenden Anomalien oder gemeldeten Verunreinigungen, eine sofortige Ueberwachung der Zuströmverhältnisse und der räumlichen Ausbreitung der Verschmutzung vorzunehmen. Mit gezielten Detailaufnahmen und Bodenerhebungen können Art, Umfang und eventuell Ursprung schneller und besser ermittelt werden, als dies mit konventionellen Mitteln möglich ist.

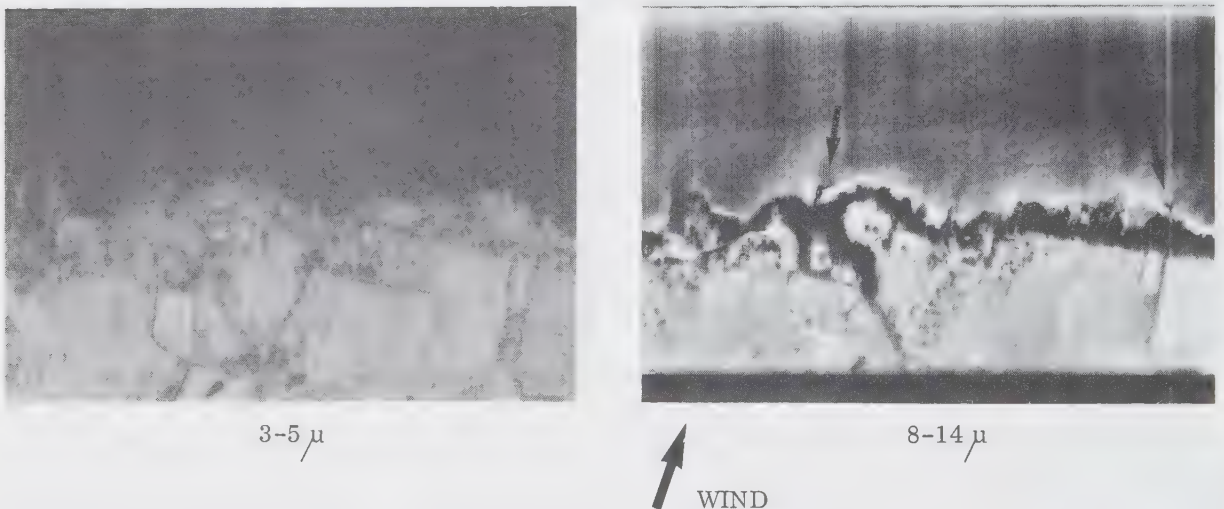


Fig. 61: Gewässerüberwachung am Bodensee, Flug Nr.11 vom 27.8.71, Zeit 14.04 .
Orientierung: S-Ufer des Bodensees bei Güttingen / TG in unterer Bildhälfte,
Bacheinläufe s. Pfeile, Windrichtung aus W/SW eingezeichnet.

An dieser Stelle muss auf ein weiteres interessantes Phänomen in Fig. 61 hingewiesen werden: Im seichten, stark mit Algen bewachsenen Ufersaum kann sich die Wassertemperatur örtlich stark erhöhen.

Interessant ist die streifenweise gerichtete Anordnung der wärmeren, im Bild helleren Wasseroberflächenpartien. Bezieht man die Hauptwindrichtung (s. Pfeil) in die Überlegungen ein, so zeichnet sich ein Bild von windgeschützten und windexponierten Zonen ab, das durch die unterschiedlich hohe und dichte Baumreihe am Ufersaum verursacht wird. Im Englischen spricht man von sog. "wind streaks". Diese speziellen Effekte, die Reflexionen und abtastwinkelbedingten Veränderungen, sowie auch die Umschalterscheinungen der AGC-Scanner müssen bei Interpretationen immer berücksichtigt werden, um Fehlschlüsse zu vermeiden. Gerade bei Umweltschutz-Anwendungen von Aeromethoden muss besonders vorsichtig und methodisch vorgegangen werden, tangiert man hier doch sehr schnell politische und wirtschaftliche Interessen.

9.3. Untersuchungen im Hochgebirge

Generell sollen hier einige Probleme diskutiert werden, die sich durch das Abbilden von Schnee und Eis im alpinen Raum mit Infrarot-Scannern ergeben. Wo panchromatische Vergleichsbilder zur Verfügung standen, werden diese mit den Thermal-Aufnahmen verglichen.

9.3.1. Tagaufnahmen von tauenden Schnee- und Firnflecken am Sidelhorn zwischen Toten- und Trübtensee im Oberaarmassiv (Fig. 62)

Im allgemeinen fällt beim 8 - 14 μ Bild die kontrastreiche Darstellung der Hydrologie auf. Während es beispielsweise auf einer panchromatischen Aufnahme schwierig ist zu entscheiden, ob ein Bachbett Wasser führe oder nicht, bietet dies im thermalen Bereich keine Probleme. Die 8 - 14 μ Thermographie zeigt kaum Unterschiede in der Temperatur der Schnee- und Firnflecken zum Wasser des kleinen Tümpels (s. Pfeil), im Gegensatz zum 3 - 5 μ Bild. Infolge der Reflexionscharakteristiken von Wasser wird feuchter Schnee im Bereich 3 - 5 μ dunkler abgebildet als trockener, darum sind die randlichen feuchten Abtauzonen bei Schnee- und Firn zu erkennen (dunkler). Sie entstehen durch die Wärmewirkung des schneefreien Felses.

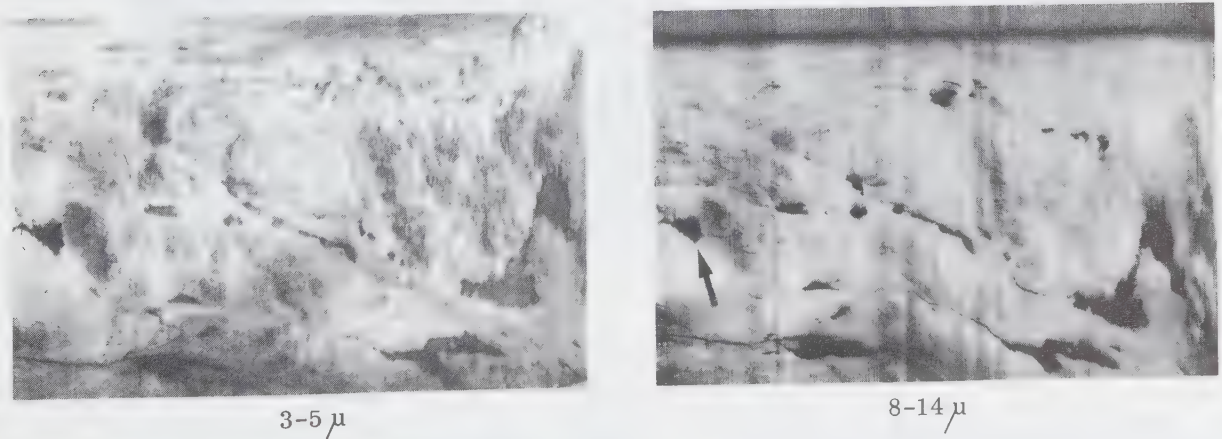


Fig. 62: Schnee- und Firnflecken am Sidelhorn zwischen Toten- und Trübtensee im Oberaarmassiv, Flug Nr. 9 vom 25. 8. 71, Zeit 14. 42. Orientierung: Bildteil unten = Nord, kleiner Tümpel s. Pfeil. Schnee- und Firnflecken = dunkel.

9.3.2. Tagaufnahmen des Oberaargletschers (Fig. 63)

Das panchromatische Vergleichsluftbild zeigt ausserordentlichen Detailreichtum inbezug auf die Gletschermorphologie und die Gliederung der Seitenmoränen und Talflanken.

Obwohl vom 3 - 5 μ Detektor bei relativ niedrigen Temperaturen keine grossen Leistungen erwartet werden, erstaunt die gute Detailwiedergabe im durch Reflexion und Emission erzeugten Bild. Das Auflösungsvermögen ist allerdings etwas geringer als bei der panchromatischen Aufnahme.

Im 8 - 14 μ Bereich sind auf dem Gletscher kaum Details zu erkennen, da die Temperaturunterschiede bei gleichzeitiger Erfassung der erwärmten Talflanken so gross waren, dass man sich mit einer relativ schlechten Auflösung begnügen muss. Die maximalen Temperaturdifferenzen auf dem Gletscher selbst betrugen zwischen Eis und Schmelzwasser ca. $1/2^{\circ}\text{C}$ und wurden deshalb nicht mehr aufgelöst. Lediglich die durch die Sonnenstrahlung aufgeheizten Moränen kontrastieren stark mit dem Gletschereis.

Bei beiden Bildern fällt im Stirnbereich des Gletschers in der rechten Seitenmoränenzone ein Stelle auf mit offensichtlich tiefen, dem Gletschereis vergleichbaren Temperaturen und einer feuchten, dem Wasser vergleichbaren Oberfläche. Die Bodenkontrolle ergab, dass es sich um einen unter der Seitenmoräne liegenden, an jener Stelle abtauenden Toteisblock handelt. Durch eine Rutschung im steilen rechten Berghang wurde das Eis freigelegt und begann abzutauen. Bei einer erneuten Kontrolle 2 Jahre später war die Stelle wieder durch nachstürzendes Material überdeckt und vor der weiteren Ablation geschützt.

Genauere Untersuchungen (weitere Feldarbeit und Befliegungen) könnten die Frage abklären, wieweit im Falle des Oberaargletschers eine Abgrenzung des Toteisblockes durch Infrarot-Methoden möglich ist. Wenn die Schuttdecke über dem Eis sehr dünn und zeitweise aufgerissen ist, so stellt dies keine Probleme. Auch wenn die kleinen, durchscheinenden Eispartien für die Einzelerfassung des beschränkten räumlichen Auflösungsvermögens wegen nicht direkt erfasst werden, so ergibt die integrierende Messung gleichwohl tiefere Messwerte als bei vollständiger Bedeckung mit Moränenmaterial.

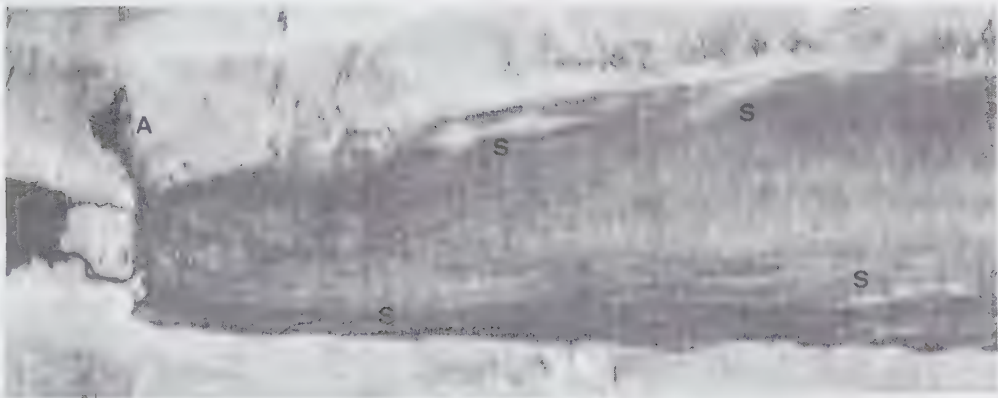
Die Wiederholung des Fluges 2 Wochen später ergab ungefähr die gleichen Resultate, nur dass der Oberaarsee etwas höher gestaut worden war und somit näher an die Gletscherstirn heranreichte ¹⁾.

1) Das panchromatische Bildmosaik (Fig. 63) und die Nachtaufnahmen (Fig. 64 + 66 - 68) stammen ebenfalls vom zweiten Flugdatum.

panchrom.
Aufn.



3-5 μ



8-14 μ

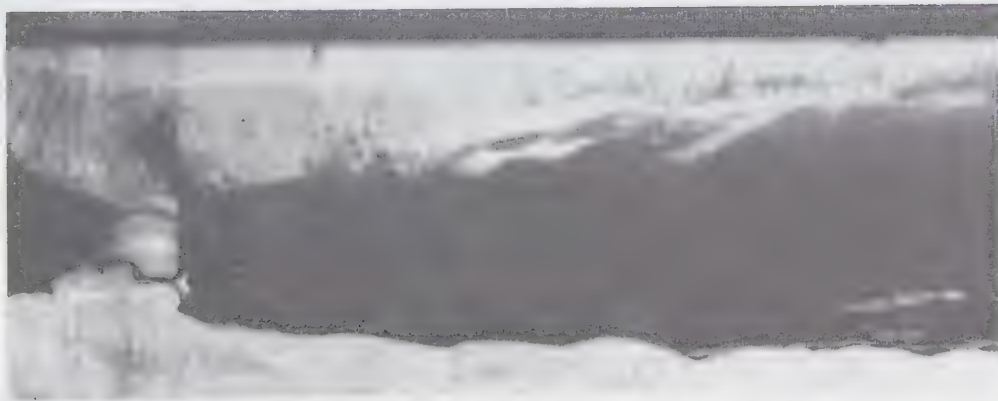


Fig. 63: Tagaufnahmen des Oberaargletschers, panchromatische Aufnahme vom 7.9.71, Zeit 14.45, Infrarot-Flug Nr. 9 vom 25.8.71, Zeit 14.43.

Orientierung: N/NW = unterer Bildteil , im Bild links = Oberaarsee, abgebildet die Gletscherzunge des Oberaargletschers, A = abtauender Toteisblock, S = Seitenmoränen.

9.3.3. Nachtaufnahme des Oberaargletschers (Fig. 64)

Diese Nachtaufnahme wurde 14 Tage nach dem Flug Nr. 9 (Fig. 63, Infrarotbereiche) gemacht. Da nur der 8 - 14 μ Detektor einwandfrei arbeitete, wird allein dieser Bildstreifen gezeigt.

Wie bereits erwähnt, wurde der Oberaarsee inzwischen höher gestaut, sodass die Sanderfläche jetzt fast vollständig vom See überflutet ist.

Im Bild werden interessanterweise die Moränen auf dem Gletscher gegenüber den felsigen Schutthängen als kühl abgebildet. Ihre Masse ist offensichtlich zu klein, um grössere Energiemengen speichern zu können, und ihr Emissionsfaktor ist sicher kleiner als derjenige von Gletschereis.

Eindeutig kann das Schmelzwasser des Gletschers beim Einfließen in den Oberaarsee vom Seewasser unterschieden werden. Ansonsten sind wenig Details zu erkennen.

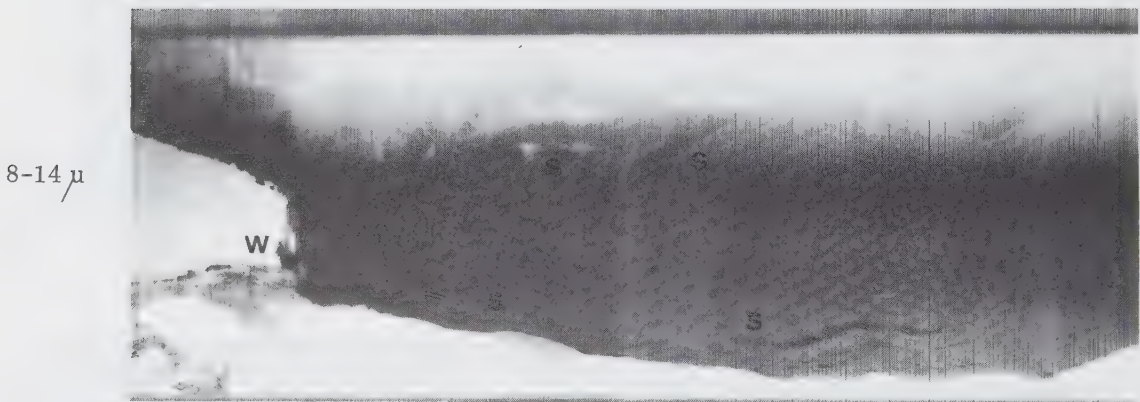


Fig. 64: Nachtaufnahme des Oberaargletschers, Flug Nr. 18 vom 7. 9. 71, Zeit 21.34, Orientierung: N/NW = unterer Bildteil, S = Seitenmoränen, W = Schmelzwasser im Oberaar-See.

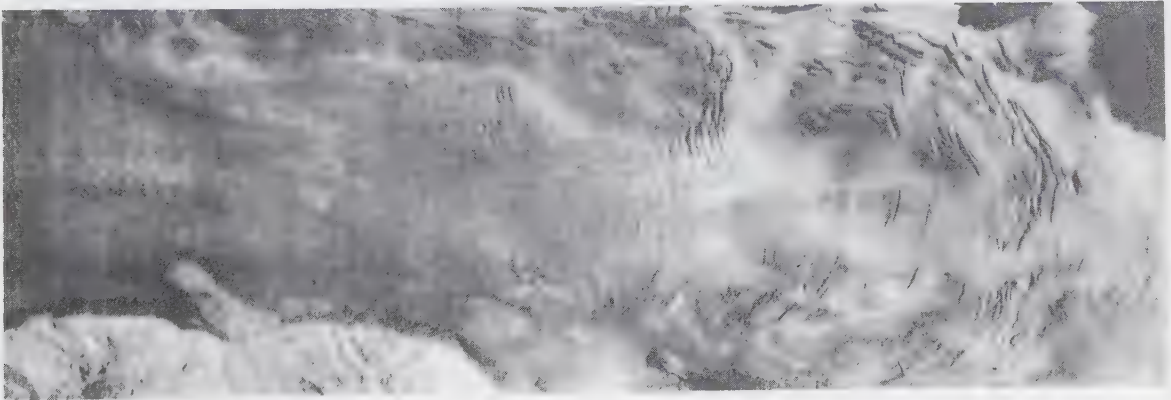
9.3.4. Tagaufnahmen im Firnbereich des Oberaargletschers (Fig. 65)

Allein das 3 - 5 μ Bild bietet dank der Reflexion von Sonnenstrahlung einen ausreichenden Detailreichtum im Vergleich zur panchromatischen Aufnahme. Spaltensysteme sowie verschiedene Eis- und Schneeoberflächentypen sind gut unterscheidbar. Der Reliefeindruck ist ausserordentlich gut.

Der 8 - 14 μ Scanner war gestört, darum wird das Bild hier nicht gezeigt.



panchromat. Aufn.



3-5 μ

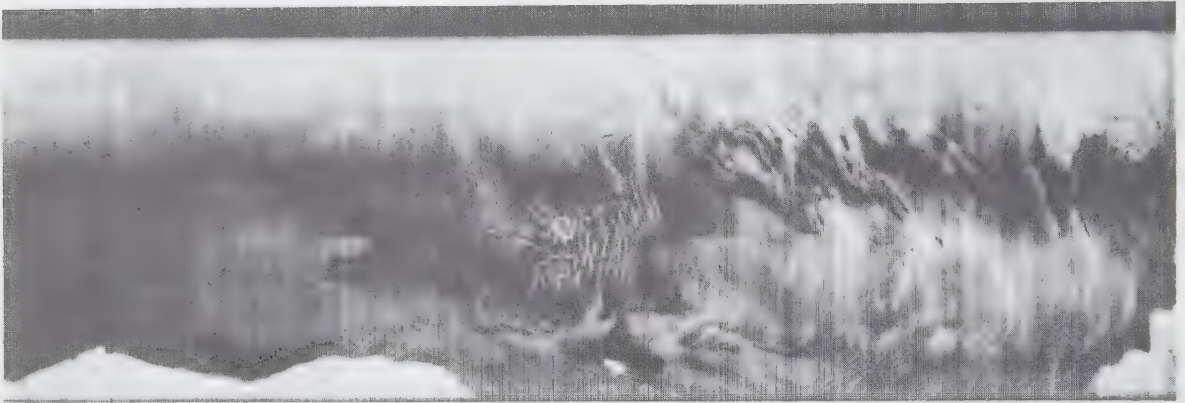
Fig. 65: Tagaufnahmen im Firnbereich des Oberaargletschers, Flug Nr. 16 vom 7.9.71, Zeit 14.45.

Orientierung: Fortsetzung des Bildstreifens von Fig. 63, rechts folgt das Oberaarjoch, N/NW = unten.

9.3.5. Nachtaufnahme im Firnbereich des Oberaargletschers (Fig. 66)

Diese Thermographie kann am besten mit dem panchromatischen Luftbild von Fig. 65 verglichen werden. Hier war nachts nur das 8 - 14 μ Bild von brauchbarer Qualität. Interessant ist die sehr gute Darstellung der luftgefüllten Gletscherspalten. Mit dem sehr hohen Emissionskoeffizienten von blankem Eis ergibt sich die starke Ausstrahlung.

Die Dimensionen der Spalten und Risse werden nicht wie in den panchromatischen Luftaufnahmen bei gewissen Beleuchtungsrichtungen und Aufnahmestandorten undeutlich, da sie entlang der Flugachse durch die Strahlung in ihrer ganzen erfassbaren Breite abgebildet werden,



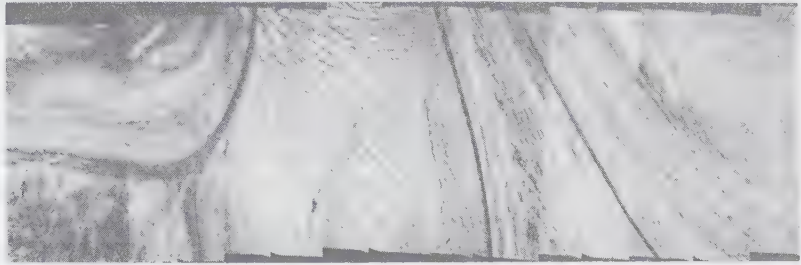
8-14 μ

Fig. 66: 8-14 μ Nachtaufnahme im Firnbereich des Oberaargletschers, Flug Nr.18 vom 7.9.71, Zeit 21.34 .
Orientierung: unten = N/NW, gleicher Ausschnitt wie bei Fig.65.

9.3.6. Nacht-Thermographie des Konkordiaplatzes (Aletschgletscher) (Fig. 67)
(Vergleich mit panchrom. Tagesaufnahmen)

Der Detailreichtum im panchromatischen Bild wird selbstverständlich von der 8 - 14 μ Abbildung nicht erreicht. Interessant sind aber die Details, die trotz ihrer relativ geringen Ausmasse abgebildet werden: Gletscherspalten, Mittelmoränen und als wichtigstes die aktiven supraglazialen Entwässerungsrinnen und die Strudellöcher sind deutlich erkennbar.

panchrom. Aufn.



8-14 μ

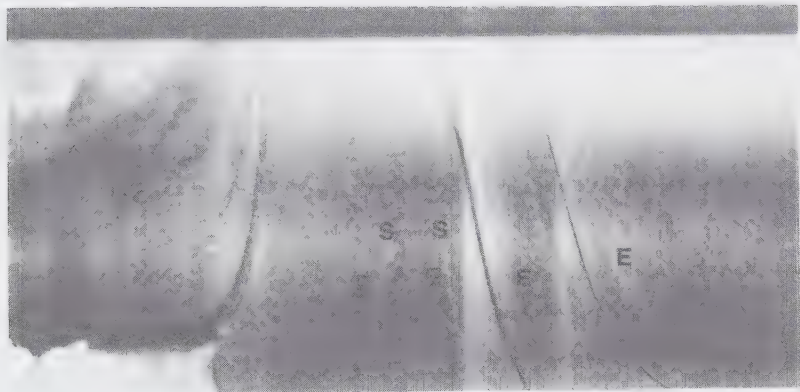


Fig. 67: 8-14 μ Nacht-Thermographie des Konkordiaplatzes, Vergleich zu panchromatischer Tagesaufnahme, Flüge Nr. 16 und 18 vom 7.9.71, Zeiten: 21.35 resp. 14.46 .
Orientierung: Aufnahmerichtung = Grüneggfirn - Aletschgletscher - Aletschfirn,
links unten = Grünegg, unten = N/NW.

E = supraglaziale Entwässerungsrinnen
S = Strudellöcher

9.3.7. Nachtthermographie des Aletschfirns im Bereich 8 - 14 μ (Fig. 68)

(Vergleich mit panchrom. Tagesaufnahmen)

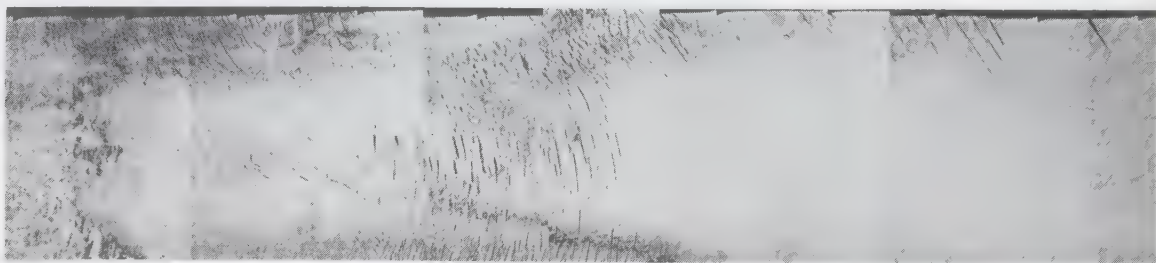
Beim folgenden Bildvergleich ist ein Aspekt besonders erwähnenswert. Es bietet immer wieder Schwierigkeiten, Schnee von Eis zu trennen. Diese Fragestellung ist einerseits interessant um die aktuelle Schneegrenze auf dem Gletscher definieren, und andererseits um schneeüberdeckte Gletscherspalten lokalisieren zu können.

In der Tabelle einiger Emissivitätskoeffizienten (Kap. 2.4.1.) werden für Schnee und Eis mit 0.85 resp. 0.96 recht unterschiedliche Werte angegeben. Daher sollte es insbesondere nachts, ohne sekundäre Aufheizungseffekte durch die Sonne, möglich sein, die beiden Elemente zu trennen. Schnee wird bei gleicher Temperatur wie das Eis theoretisch dunkler abgebildet.

Auf dem Bildausschnitt (A) der 8 - 14 μ Nachtaufnahme ist ein Uebergang von hell zu dunkel und damit die Schneegrenze gut erkennbar. Eine derartige Grautongrenze darf aber nicht unbesehen als Schneegrenze bezeichnet werden, da der dunklere Ton genauso gut durch eine Partie von stärker verschmutztem oder von Moränenmaterial bedecktem Eis bewirkt werden könnte. Spezielle Bodenmessungen mit Infrarot-Strahlungsthermometern und die Berechnung von Emissionskoeffizienten für alle vorkommenden Gletscheroberflächentypen müssen durchgeführt werden, um Klarheit über die spektrale Emission und die Unterscheidbarkeiten zu gewinnen. Im dunkleren Bereich A sind die luftgefüllten Gletscherspalten sehr gut abgebildet. Das blanke Eis, das in den Spalten hervortritt, strahlt mit seinem sehr hohen Emissionskoeffizienten bei gleicher Temperatur wie die Gletscheroberfläche mehr Strahlungsenergie aus. Im helleren Gletscherbereich (C) sind die Spalten gleichermassen deutlich wie im Bereich A abgebildet. Daneben fällt aber auf, dass sie stellenweise dunkel überdeckt sind (B). Die streifenweise spaltenparallele Anordnung der dunklen Partien lässt den Schluss zu, dass es sich hierbei um schneebedeckte Spalten handelt.

Die besonders für den Alpinisten gefährliche Zone des Gletschers, in der noch viele Gletscherspalten mit Schnee überdeckt sind, ist mit Nacht-Thermographien gut in ihrer Differenziertheit erfassbar.

panchrom.
Aufn.



8-14 μ

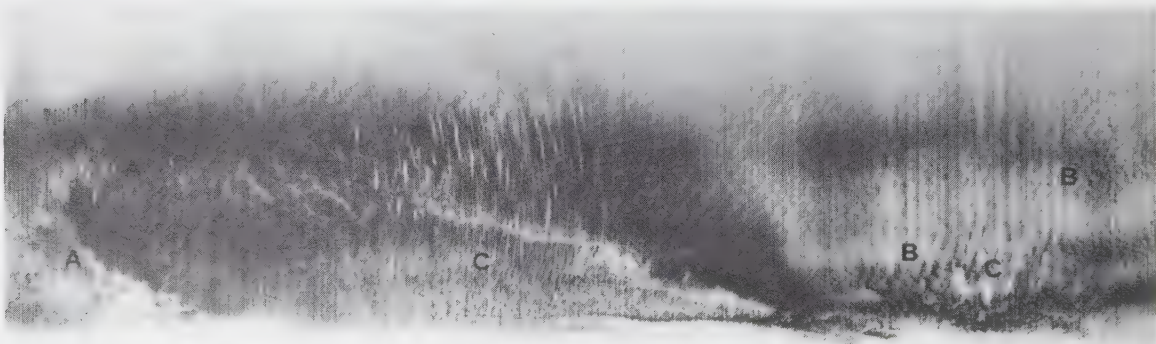


Fig. 68: 8-14 μ Nacht-Thermographie des Aletschfirns, Flüge Nr. 16 u. 18 wie bei Fig. 67.
Links Richtung Konkordiaplatz, rechts Richtung Lötschenlücke, unten = N/NW
A = Schneegrenz-Bereich B = Zone von durch Schnee überdeckten Gletscherspalten
C = offene Gletscherspalten

9.4. Untersuchungen im Karst des Neuenburger Juras (Fig. 69)

Bei Fig. 69 wurden die panchromatischen Vergleichsbilder 2 Jahre später, bei gleichen Wetterbedingungen, zur gleichen Jahreszeit und bei gleichem Sonnenstand gemacht. Einzelne Agrarflächen dürfen darum nicht mehr direkt miteinander verglichen werden.

Bei beiden Flugdaten herrschten neben wenigen Getreidefeldern am Talrand (ca. 5 %) die Wiesen vor. An tiefer gelegenen Stellen des Talbodens sind z. T. Ueberreste eines Hochmoors zu finden. Dort wird heute noch Torf gestochen. Die Talschaft ist geprägt durch Karstphänomene die bewirken, dass das ganze Gebiet unterirdisch entwässert wird. Auch der nahe gelegene Lac des Taillères hat nur unterirdischen Abfluss. Im Thermalbereich ist demnach auch keine oberflächliche Entwässerung sichtbar.

Ganz besonders auffällig sind die parallel zu den Juraketten laufenden Schwächezonen im Kalkuntergrund. Hier soll vorab die Frage interessieren, wieweit Infrarotsensoren, die durch Karstprozesse bedingte Topographie erkennen lassen.

Bei panchromatischen Reihenbildern ergibt sich immer die Schwierigkeit, dass bei Montagen der Bilder zu Mosaiken die randlichen Lichtabfälle jedes Einzelbildes zur Störung des Gesamteindrucks führen, wogegen kontinuierliche Bildstreifen diesen Nachteil nicht aufweisen.

Im panchromatischen Luftbild mit seinem ausserordentlichen Detailreichtum, werden die unterschiedlichen Reife- und Erntegrade bei den Wiesen sehr stark differenziert abgebildet. Dieselben prägen auch die im 8 - 14 μ Infrarotbild auftretenden Strahlungstemperaturunterschiede und lassen damit die topographischen Gegebenheiten in den Hintergrund treten.

Als besonders günstig wirkt sich dagegen die relative Unempfindlichkeit gegenüber Anbau- und Ernteunterschieden im 3 - 5 μ Bereich aus. Die Mischung von reflektierter Sonnenstrahlung und Thermalstrahlung ist stark vom Sonnenazimuth und der Exposition des Geländes abhängig, wodurch sich eine gute Darstellung des Kleinreliefs ergibt.

Die Resultate der Winkel-Versuchsmessungen (Kap. 5.2.1.) finden hier eine Bestätigung in der Praxis. Die Oberflächenformen, die Rückschlüsse auf den verkarsteten Kalkuntergrund zulassen, werden äusserst klar abgebildet. Es sind dies insbesondere die entlang von linearen Schwächezonen angeordneten Dolinenreihen. Alle Formen von reinen Lösungsdolinen bis zu Einsturzformen sind hier anzutreffen.

Besonders erstaunt die Tatsache der gerichteten Strahlung, die im Bereich 3 - 5 μ eine so bedeutende Rolle spielt. Die Formen der Dolinen werden nicht etwa durch Schattenwirkung erzeugt, da diese sonst beim panchromatischen Bild ebenfalls auftreten müssten (Aufnahme- und Sonnenwinkel sind bei allen Bildern gleich). Die Strahlungs- und Reflexionsunterschiede beruhen auf der unterschiedlichen Exposition. Daher wirkt das 3 - 5 μ Bild weitaus am plastischsten und lässt auch ohne stereoskopische Technik die topographischen Formen sehr gut interpretieren.



panchrom. Aufn.



3-5 μ



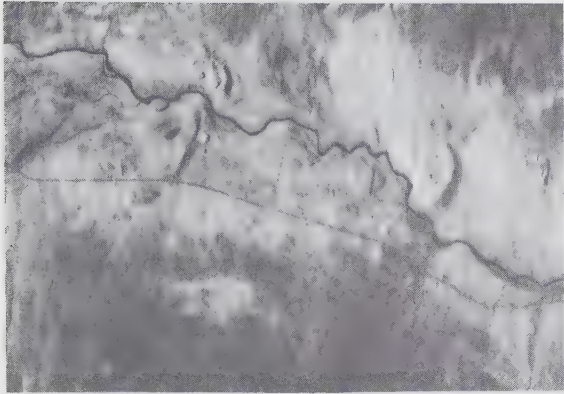
8-14 μ

Fig. 69: Karstbedingte Topographie im Neuenburger Jura, SW des Lac des Taillères.
Infrarot-Flug vom 8.9.71, Zeit 14.07, panchrom. Aufnahme 24.8.73, Zeit 14.30 .

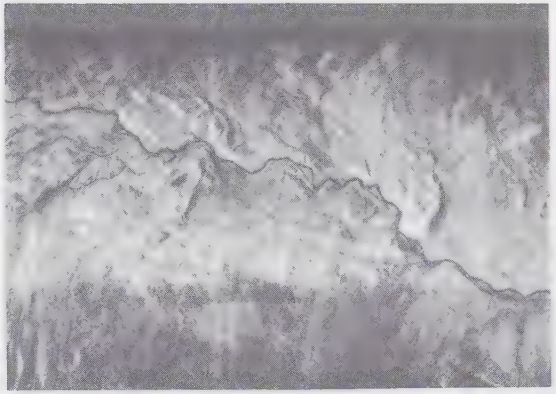
- A = Beispiel für Lösungsdoline
- B = Beispiel für Einsturzdoline
- T = Hochmoor-Rest
- E = Entwässerungsgräben

9.5. Geländedarstellung im alpinen Bereich (Fig. 70)

Am vorigen Beispiel wurde die topographische Geländeerfassung im Karstgebiet des Jura mit seinen relativ weichen, gewellten Formen gezeigt. Die Erkennbarkeit im $3 - 5 \mu$ Bereich trat dabei besonders in den Vordergrund. Am Beispiel des Dischmatales interessiert die gleiche Fragestellung in einem alpinen Tal mit Berghängen grosser Reliefenergie, starker Gliederung und kristallinem Untergrund.



$3-5 \mu$



$8-14 \mu$

Fig. 70: Geländedarstellung im alpinen Bereich bei Infrarot- Tagaufnahmen, am Beispiel des Dischmatales bei Davos.

Orientierung: Rechts Richtung Davos, links Richtung Dürrboden, links oberhalb Bildzentrum = Schürlialp und Grossalp.

Das Fehlen der landwirtschaftlichen Intensivnutzung bringt für den 8 - 14 μ Bereich den Vorteil, dass durch die natürliche Infrarotemission der Vegetation und der unbewachsenen Böden (durch Besonnungs- und Schattenwirkungen) ein ausserordentlich plastisches Bild der Topographie erfasst wird. Durch die starke Gliederung des Reliefs, die spezielle Aufnahmezeit und den Sonnenwinkel sind im alpinen Bereich Kleinformen sehr oft aufgrund ihrer Schattenwirkungen erkennbar. Die Vegetationsdecke hindert mit Ausnahme des Waldes diese Abbildung kaum, da sie nur schwach in Erscheinung tritt.

Die Abbildung im 3 - 5 μ Bereich ist auch in diesem Falle wieder gut für die topographische Geländebeurteilung geeignet. Die Hydrologie tritt in beiden Aufnahmen wiederum besonders klar zum Vorschein.

Ist im Jura der 3 - 5 μ Scanner für die rein-topographische Erfassung eindeutig überlegen, so sind hier beide Bereiche mit gutem Erfolg anwendbar, wobei das 8 - 14 μ Bild sogar leichte Vorteile im Erfassen von Kleinformen des Reliefs zeigt.

9.6. Abschliessende Bemerkungen und Ausblick

Im vorigen Kapitel wurden einige weitere Anwendungen von Thermalscannern der Testserie 1971 und die damit verbundenen geographischen Problemkreise aufgezeigt. Wie die Gegenüberstellung mit der Tabelle aller durchgeführten Flüge (Kap. 3) zeigt, musste eine Auswahl aus der Fülle des Bild- und Datenmaterials getroffen werden. Dabei wurde versucht, für ein gegebenes Thema je ein Beispiel anzuführen. Nicht immer gelang die Wiederholung von aus der Literatur bekannten Anwendungen. Gerätetechnische Schwierigkeiten sowie ungünstige meteorologische Bedingungen spielten dabei eine ausschlaggebende Rolle. Gleichwohl konnten aufgrund der erfolgreich durchgeführten Versuche verschiedenartige Einsatzmöglichkeiten gezeigt werden, die Anlass zu weiteren systematischen Untersuchungen und praktischen Anwendungen bieten.

Grundlagenforschung, vor allem intensive Untersuchungen mit Infrarot-Spektorradiometern sollen dazu beitragen, die Anwendungsbereiche von Infrarotsensoren auszuweiten. Damit können die ehemals für ganz andere Zwecke konzipierten komplexen Verfahren im zivilen Bereich nutzbringend eingesetzt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Hauptaufgabe dieser Arbeit bestand in der Untersuchung von Bedeutung und Nutzen von Infrarot-Thermographien bei geographischen und allgemein erdwissenschaftlichen Problemstellungen. Selbst für unkalibrierte Scanner, die eine quantitative Interpretation der Daten erschweren, da jede einzelne Scanlinie für sich betrachtet werden muss, konnten Bedeutung und Anwendungsgebiete anhand einer ganzen Reihe von Themenkreisen demonstriert werden.

In einem 4 Wochen dauernden Grossversuch mit Flügen bei Tag und bei Nacht mit je einem Scanner in den Wellenlängenbereichen von $3 - 5 \mu$ und $8 - 14 \mu$, sowie teilweise vergleichenden Luftbildaufnahmen, wurde der Erfassung des komplexen Zusammenhangs zwischen Infrarot-Strahlungstemperaturen von landwirtschaftlichen Flächen und meteorologischen Mess-Parametern besondere Beachtung geschenkt.

Mit der Methode der schrittweisen multiplen Regression und Korrelation konnte mit den gemessenen Daten bis zu durchschnittlich 95% der Streuung der $8 - 14 \mu$ Strahlungstemperaturen der einzelnen Felder durch die Variablen "Lufttemperatur", "rel. und spezifische Luftfeuchtigkeit" sowie "Windgeschwindigkeit" erklärt werden.

Das Besondere an diesen im Testgebiet Mauensee durchgeführten Versuchen war die Tatsache, dass jedes Feld im $8 - 14 \mu$ Strahlungstemperaturverhalten ein Individuum darstellt, dessen Reaktionen bestimmt werden durch seine Anbauart, seine Lage, Exposition, seinen Wachstumszustand und Reifegrad sowie durch seine Nachbarbeziehungen.

Eine Voraussage der Wirkung der erwähnten Parameter ohne die genaue Kenntnis der Verhältnisse in einem zu befliegenden Gebiet, dürfte sehr schwer möglich sein.

Im bearbeiteten Fall verhinderten die grossen lokal bedingten Streuungen der Strahlungstemperaturwerte innerhalb der einzelnen landwirtschaftlichen Kulturen eine klare Trennung der einzelnen Anbauarten im thermalen Bereich von $8 - 14 \mu$, wie auch im durch reflektierte Sonnenstrahlung beeinflussten $3 - 5 \mu$ Wellenlängenbereich.

Dieses Resultat hat Gültigkeit für die phänologischen und klimatologischen Gegebenheiten im Testzeitraum. Es darf aber angenommen werden, dass die Aussagen auf die ganze Anbauperiode in vergleichbaren Klimabereichen ausgedehnt werden können.

Anhand einiger Beispiele von Thermographien wurden Möglichkeiten der Anwendung der Infrarot-Technik in der Geographie aufgezeigt. Darunter sind besonders erwähnenswert die Probleme des Einflussverhaltens von Flüssen in Seen, die thermale Gewässerbelastung durch das Kühlwasser eines Kernkraftwerkes und allgemeine Gewässerüberwachungen zum Gewässerschutz. Im Hochgebirge standen Probleme des Erkennens von tauendem zu trockenem Schnee, der Detailwiedergabe in den beiden Bereichen $3 - 5$ und $8 - 14 \mu$ im Glazialbereich, der Abbildung von Gletscherspalten bei Tag und Nacht, die Detektion von supraglazialen aktiven Entwässerungsrinnen bei Nacht, die Festlegung der Schneegrenze auf einem Gletscher, sowie die Erkennung von schneebedeckten Gletscherspalten bei Nachtaufnahmen im Bereich $8 - 14 \mu$ im Vordergrund. Im Bereich $3 - 5 \mu$ liess sich die karstbedingte topographische Oberfläche an einem Beispiel im Neuenburger Jura sehr gut interpretieren, während beide Bereiche bei der Anwendung im alpinen Dischmatal ausgezeichnet zur Gelände- und Kleinformen-Darstellung geeignet sind.

SUMMARY

The main objectives of the study are to evaluate the significance and usefulness of IR-imagery for geographic and other earth resources applications. Despite the unsatisfactory imagery gained from uncalibrated scanners, some important basic research problems as well as practical applications could be investigated and demonstrated.

In a four weeks test period with day and night flights using two scanners simultaneously, one in the 3 - 5 μ and the other in the 8 - 14 μ band, and partly supplemented by panchromatic aerial photographs, special efforts were made to investigate the interrelationship between infrared radiation of different agricultural crop types, and various meteorological variables.

With a multiple stepwise regression and correlation up to an average of 95 % of the variation in the 8 - 14 μ radiant temperature of the individual fields could be explained by the variables "air temperature", "relative and specific air humidity" and "wind velocity".

The most important result of that investigation carried out at the "Mauensee test area" (Cantone Lucerne, Switzerland) is the individual behaviour of each crop field regarding the 8 - 14 μ radiant temperature. Its reaction is influenced by the crop type, the sowing characteristics, the plant canopy, the growing conditions, the exposure toward sun and wind as well as by effects caused by neighbouring fields.

Therefore it would hardly be possible to predict the influence of the above-mentioned parameters without a detailed knowledge of the meteorological and phenological situation of the study area.

For our test site the large locally induced variations of the radiant temperature within a specific crop type made it impossible to identify individual crops clearly in both wavelength bands.

These results are approved only for the phenological and meteorological conditions that existed in the test area during the surveying period. But it is believed, that the results are applicable for the total growing season in comparable climatic regions.

Further possibilities to apply the IR remote sensing techniques in geography are shown by various regional and thematic examples. The following problems were of special interest: River inflow pattern into lakes; thermal effluents of a nuclear power plant; survey of rivers and lakes regarding pollution for monitoring the environment. In high mountain regions the studied problems are the separation of melting versus dry snow, the survey of glacier surfaces and its environment in the 3 - 5 μ and 8 - 14 μ band on day and night images, e.g. the determination of crevasses, the identification of surface runoff features, the deliniation of the snowline on a glacier and the detection of snow-covered crevasses on night images in the 8 - 14 μ band. For the interpretation of "karst"-induced relief covered with vegetation in the Jura Mountains, the 3 - 5 μ image proved to be especially useful, whereas in alpine vallies both wavelength-regions could be successfully applied to determine detailed topographical features.

LITERATURVERZEICHNIS

Abkürzungen: BuL = Bildmessung und Luftbildwesen
 PE = Photogrammetric Engineering
 RS = Remote Sensing of Environment (speziell bei Symposien)

- Adams, W.M. + Lepley, L. + Warren, C. + Chang, S.: Coastal and Urban Surveys with IR, PE 2/70, S. 173 - 180.
- Ahmad, M.U. + Gosh, B.A.: Temperature Survey of Coal Mines Producing Acid Water, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 1109 - 1154.
- Air Intelligence Training Center: Infrared Theory and Interpretation, Advanced Imagery Interpretation Notes, Student Text, Lowry Col. 1969, S. 4.1 - 4.21.
- Annable, R.V. + DeBrosse, K.L. + Leiter, H.A. + Wallschläger W.H.: Le rayonnement infrarouge et le radiomètre a haute résolution de "Nimbus", Revue des Télécommunications Vol.40, No.4, 1965, S. 535 - 542.
- Anonymus: Techniques for Qualitative and Quantitative Evaluation of Infrared Imagery, Water and Land Resources Department, BNWL-SA, 1968, 26 S.
- Antonini, G.A.: Infrared Image Applications in Studies of the Marine Environment, 3rd Symp. on RS - Proceedings, Ann Arbor 1964, S. 781 - 788.
- Astheimer, R.W.: An Infrared Radiation Air Thermometer, Proc. 2nd Symp. on RS, Ann Arbor 1962, S. 375 - 391.
- Astheimer, R.W.: An Infrared Technique for the Remote Detection of Clear Air Turbulence, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 105 - 123.
- Baily, E.M. + Parish, W.R.: Portable Low Cost Detector for Latent Forest Fires, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 649 - 666.
- Barnes Engin. Company: Infrared and Electro-Optics, BEO, Stamford, Conn., 1966.
- Barnes Engin. Company: Infrared and Electro-Optics, Diurnal Variation of Infrared Radiation from Natural and Man-Made Materials as Measured by Infrared Thermography, Stamford 1966, 13 S.
- Bartman, F.L.: Infrared and Visible Radiation Measurements by Radiometer on High Altitude Ballon Flights at 34 km Altitude, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 377 - 392.
- Bastuscheck, C.P.: Ground Temperature and Thermal Infrared, PE 10/1970, S. 1064 - 1072.
- Bendix Corp.: Geologic Units South of Golden, Colorado, Differentiated by Bendix Thermal Infrared Imagery, ASP-Meeting, Washington 1969, 2 S.
- Bendix Corp.: Bendix Thermal Mapper Application in Area of Hydrology and Water Resources Management, ASP-Meeting, Washington 1969, 2 S.
- Bendix Corp.: Bendix Thermal Mappers, Soil Type Mapping for Construction Sites, Bendix Aerospace Systems Div., 1969, 2 S.
- Bendix Corp.: Thermal Mapping Application in the Area of Agriculture and Forestry, ASP-Meeting, Washington 1969, 2 S.

- Bendix Aerospace Systems Div.: Thermal Contouring with the Bendix Thermal Mapper, Ann Arbor 1969, 2 S.
- Bendix Aerospace Systems Div.: Bendix Thermal Mapper, Water Pollution Control and Water Resources Management, 1969, 2 S.
- Bendix Aerospace Systems Div.: Detecting Fresh Water Flow into Salt Water, Mono Lake Calif., 1970, 4 S.
- Bendix Aerospace Systems Div.: Experimental Applications of the Bendix Thermal Mapper to Mining Geophysics, Ann Arbor 1970, 18 S.
- Bendix Aerospace Systems Div.: A Scanning Radiometric System for Light Aircraft Remote Sensing, Ann Arbor 1970, 19 S.
- Berberian, G.A. + Oshiver, A.H. + Clark, J.R. + Stone, R.B.: Remote Measurement of Absolute Sea Surface Temperature by Infrared Radiometry, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 737 - 762.
- Bjornsen, R. L.: Infrared Mapping of Large Fires, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1968, S. 459 - 464.
- Blalock, H.M.Jr.: Social Statistics, Internat. Student Ed., Mc Graw-Hill, London, New York 1960.
- Blythe, R. + Kurath, E.: Some Effects of Water Vapor and Transpiration Upon IR Images in the 3.69 to 5.5 Micron Region, Bendix Aerospace Div., Ann Arbor 1967, 15 S.
- Blythe, R. + Kurath, E.: Infrared and Water Vapor, PE 7/1967, S. 772 - 777.
- Blythe, R. + Kurath, E.: Thermal Mapping, Bendix Corp., Bendix Techn. Journal, 1968, S. 66 - 71.
- Bodechtel, J.: Thermal Infrared Scanner for Hydrogeological and Geological Survey in the Northern Alps, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 365 - 372.
- Bodechtel, J.: Anwendung der Fernerkundungstechniken und Satellitenbilddauswertung in den Erdwissenschaften, Inst.f.Geologie und Mineralogie der Univ.München, 1971, 35 S.
- Buettner, K.J.K.: The Consequences of Terrestrial Surface Infrared Emissivity, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 549 - 561.
- Cantrell, J.L.: Infrared Geology, ACSM-ASP Convention, Washington 1964, 20 S.
- Cantrell, J.L.: Infrared Geology, PE 6/1964, S. 916 - 922.
- Cassinis, R. + Marino, C.M. + Tonelli, A.M.: Evaluation of Thermal IR Imagery on Italian Volcanic Areas, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 81 - 98.
- Cassinis, R.: Remote Sensing, an Evaluation of its Impact on Earth Science, Cattedra di Fisica Terrestre, Università di Milano 1972, 22 S.
- Chandler, P.B.: Remote Detection of Oil Pollution within the 8 - 14 μ Infrared Region, Proc. 36th Ann.ASP-Meeting, Falls Church 1970, S. 405 - 421.
- Chapman, P. + Brennan, P.: Ground Truth Acquisition, 1st Annual IRSI Symp. Vol I, Sacramento, Calif. 1969, S. 140 - 162.
- Colwell, R.N. + Olson, D.L.: Thermal Infrared Imagery and its Use in Vegetation Analysis by Remote Reconnaissance, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 607 - 621.

- Colwell, R.N.: Agricultural and Forestry Uses of Thermal Infrared Data Obtained by Remote Sensing, AIAA Thermophysics Specialist Conference, New Orleans 1967, 13 S.
- Cooper, C.F.: Potential Applications of Remote Sensing to Ecological Research, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 601 - 606.
- Daniels, D.L.: Infrared Spectral Emittance of Rocks from the Pisgah Crater and Mono Crater Areas, California, Earth Resources Survey Program, Techn. Letter NASA Supplement 13-A, Manned Spacecraft Center Houston 1967, 4 S.
- DeCotijs, A.G. + Conlan, E.: Cloud Information in Three Spatial Dimensions Using IR Thermal Imagery and Vertical Temperature Profile Data, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 595 - 606.
- Derenyi, E.E. + Konecny, G.: Infrared Scan Geometry, PE 5/1966, S. 773 - 778.
- Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung: Tabellen der spektralen Strahldichte des schwarzen Körpers, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1972, 191 S.
- Dijk van, C. + Mulder C.J. + Poley, J.P. + Steveninck van, J.: Exploration for shallow Geological Structures with the Thermal Infrared Imagery, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 2115 - 2132.
- Ehlers, D.E.: Temperature Measurements of Earth and Clouds from a Satellite, 2nd Symp. on RS, Ann Arbor 1962, S. 234 - 265.
- Elder, F.C. + Thomson, K.P.B.: Thermal Scanner Observations over Lake Ontario, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 1095 - 1108.
- Eliason, J.: Techniques for Evaluating IR-Imagery from Aerial Line Scanners and High Speed Infrared Cameras, 1st Annual IRSI Symp. Vol.I, Sacramento Calif. 1969, S. 265 - 278.
- Eller, B.M.: Energiebilanz und Blattemperatur, Diss. Universität Zürich 1971, 180 S.
- England, G. + Morgan, J.O.: Quantitative Airborne Infrared Mapping, Selected Papers on Remote Sensing, Am.Soc.of Photogramm., Willow Run Lab. 1966, S. 147 - 156.
- Estes, J.E.: Some Geographic Applications of Aerial Infrared Imagery, Proc. 4th Symp. on RS, Ann Arbor 1966, S. 173 - 181.
- Estes, J.E. + Golomb, B.: Oil Spills: Method for Measuring Their Extent on the Sea Surface, Science 14. Aug. 1970, Vol 169, S. 676 - 678.
- Fagerlund, E. + Kleman, B. + Sellin, L. + Svensson, H.: Physical Studies by Thermal Mapping, Earth Science Reviews 6/1970, S. 169 - 180.
- Friedman, J.D.: Infrared Surveys of the Neovolcanic Median Zone of Iceland, Dept. of Geol. Sciences, Cornell University 1968, 3 S.
- Friedman, J.D. + Williams, R.S.: Infrared Sensing of Active Geologic Processes, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1968, S. 787 - 816.
- Friedman, J.D. + Williams, R.S.: Comparison of 1968 and 1966 Infrared Imagery of Surtsey, Reprint: Surtsey Research Progress Report V/1970, 5 S.
- Garnier, B.J.: The Observation of Topographic Variation in Surface Radiative Temperatures by Remote Sensing from a small Aircraft, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 495 - 500.

- Gates, D.M.: Characteristics of Soil and Vegetated Surfaces to Reflected and Emitted Radiation, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 573 - 599.
- Gates, D.M.: Infrared Measurement of Plant and Animal Surface Temperature and their Interpretation, Remote Sensing in Ecology, Univ. of Georgia, Athens 1969, S. 95 - 107.
- Green, G.W. + Moxham, R.M. + Harvey, A.H.: Aerial Infrared Surveys and Borehole Temperature Measurements of Coal Mine Fires in Pennsylvania, Proc. 6th Symp. on RS, Ann Arbor 1969, S. 517 - 526.
- Green, G.W.: Mineral Exploration Using an Airborne Infrared Imaging System, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 1273 - 1274.
- Haefner, H.: Vegetation und Wirtschaft der oberen subalpinen und alpinen Stufe im Luftbild, Landeskundliche Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum, Heft 6, Bad Godesberg 1963, 117 S.
- Haefner, H.: Moderne Lufteerkundungssysteme, Neue Zürcher Zeitung, 18.8.1965, Nr. 3383 (126), 6 S.
- Haefner, H.: Neue Verfahren der Lufteerkundung und ihre Anwendungsmöglichkeiten, Erdkunde, Band XX, LfG. 2, Bonn 1966, S. 130 - 141.
- Haefner, H. + Maurer, H. + Schoedler, J. + Gfeller, R.: Zur automatischen Messung und Registrierung von Schwärzungsverteilungen und Texturen, BuL 4/1972, S. 173 - 182.
- Harris, D.E. + Woodbridge, C.L.: Terrain Mapping by Use of Infrared Radiation, PE 1/1964, S. 134 - 139.
- Hase, H.: Surface Heat-Flow Studies for Remote Sensing of Geothermal Resources, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 237 - 246.
- Hasell, P.G. + Williams, R.S. + Sellman, A.N.: Thermographic Mosaic of Yellowstone National Park, Proc. 37th Ann. ASP-Meeting, Falls Church 1971.
- Hawker Siddeley Dynamics Limited: Infrared Linescan Type 212, Brochure GWSE 6001, Issue 2, Hatfield 1973.
- Hesler, A.von+Steinmetz, H.J. + Völger, K. + Lamp, W. + Lorenz, D.: Lufthygienisch-meteorologische Modelluntersuchung in der Region Untermain, 3. Arbeitsbericht: Infrarot-Thermographie, Regionale Planungsgemeinschaft Untermain, Frankfurt a.M. 1972, 56 S.
- Hirsch, S.N.: Applications of Remote Sensing to Forest Fire Detection and Suppression, Proc. 2nd Symp. on RS, Ann Arbor 1962, S. 295 - 308.
- Hirsch, S.N.: Preliminary Experimental Results with Infrared Line Scanners for Forest Fire Surveillance, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 623 - 648.
- Hirsch, S.N.: Project Fire Scan - Summary of 5 Years'Progress in Airborne Infrared Fire Detection, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1968, S. 447 - 458.
- Holmer, R.C. + Strangway, D.W.: Infrared Geology, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 293 - 319.
- Holter, M.R.: Infrared and Multispectral Sensors, Paper: Conf. on the Use of Orbiting Spacecraft in Geographic Research, Houston 1965, 12 S.
- HRB-Singer, Inc.: Instruction Manual for Reconofax VI Infrared Mapping Set, 2nd Printing, State College 1969.

- Hudson, R.D.: Infrared System Engineering, Wiley Interscience - John Wiley & Sons, New York 1969, 642 S.
- Hunter, G.T.: Infrared Scanning for Terrain Data Acquisition, Thesis Dept. of Civil Engineering, Toronto 1969, 210 S.
- Itten, K.I.: Auswertung von Infrarot-Linescan Aufnahmen, unpubl. Bericht Universität Zürich 1973, 76 S.
- Järvensted, R. + Lindqvist, S. + Mattson, J.O. + Svensson, H. + Bergsten, K.E.: Televisionssystem, div. Beiträge in: Mitteilungen aus der Univ. Lund, Svensk Geografisk Arsbok 44, 1968, S. 7 - 68.
- Kennedy, J.M. + Wermund, E.G.: Oil Spills, IR and Microwave, PE 12/1973, S. 1235 - 1242.
- Keller, F.: Applications of Side-Looking Radar and Infrared Sensing to Geological Surveys, Grumman Aerospace Corp. New York 1969, 32 S.
- Ketchum, R.D. + Wittman, W.I.: Infrared Scanning the Arctic Pack Ice, Proc. 4th Symp. on RS, Ann Arbor 1966, S. 635 - 656.
- Kleman, B.: Thermal Mapping, Paper Stockholm Symposium on RS, Stockholm 1969, S. 17 - 21.
- Knuth, W.M. + Fischer W. + Stingelin, R.W.: Detection, Delineation and Monitoring of sub-surface Coal Fires by Aerial Infrared Scanning, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1966, S. 877 - 881.
- Kock de, R.B.: Interpretability of an Aerial Thermograph with Respect to Forest Disease Detection, Paper, Comm. VII, ISP-Congress Ottawa 1972, S. 23 - 31.
- Köpfli, M.: Infrarottechnik, NZZ Mittwoch, 25. Juni 1969, Nr. 381, S. 15 + 16.
- Konoski, C.F.: Water and Cloud Temperatures Measured from U-2 Aircraft, Bull. of the American Meteorological Soc. Vol 45, No. 9, 1964, S. 581 - 586.
- Kuhn, W.: Physikalisch-meteorologische Ueberlegungen zur Nutzung von Gewässern für Kühlzwecke, Arch Met. Geoph. Biokl. Se. A, 21, 1972, S. 95 - 122.
- Larrowe, V.L.: A Moving Window Display for Infrared Imagery, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 1497 - 1501.
- LARS-Purdue: Absolute Scene Radiance Spectra in the 4 to 16 Micron Region, LARS Information Note 022268, Purdue University, Lafayette, Ind. 1968, 14 S.
- Latham, J.P. + Witmer, R.E.: Comparative Waveform Analysis of Multisensor Imagery, PE 7/1967, S. 779 - 786.
- Lattman, L.H.: Geologic Interpretation of Airborne Infrared Imagery, Proc. 2nd Symp. on RS, Ann Arbor 1962, S. 289 - 293.
- Lee, K.: Infrared Exploration for Shoreline Springs at Mono Lake, California, Proc. 6th Symp. on RS, Ann Arbor 1969, S. 1075 - 1100.
- Lindqvist, S.: Temperature Differencies Caused by Built-up Areas Detected with Remote Sensing Technique, Stockholm Symp. on RS, 1969, S. 25 - 27.
- Loor de, G.P. + Jurriens, A.A. + Levelt, W.J.M. + Geer van de, J.P.: Line-Scan Imagery Interpretation, PE 5/1968, S. 502 - 510.
- Lopik van, J.R. + Pressman, A.E. + Ludlum, R.L.: Mapping Pollution with Infrared, PE 6/1968, S. 561 - 564.
- Lopik van, J.R. + Ramble, G.S. + Pressman, A.E.: Pollution Surveillance by Noncontact Infrared Techniques, Journal Water Pollution Control 1/1968, S. 425 - 438.

- Lorenz, D.: Zur Methodik der Oberflächentemperaturmessung von Wasser mit Infrarot-Strahlungsthermometern, Deutscher Wetterdienst "Zentralamt", Offenbach a.M. 1970 (a), 69 S.
- Lorenz, D.: Flugzeugmessungen der Oberflächentemperatur über See, Zentralamt Dt. Wetterdienst, Offenbach a.M. 1970 (b), 45 S.
- Lorenz, D.: Der Einfluss der Schrägsicht auf die radiometrische Bestimmung der Temperatur von Bodenoberflächen, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B 1970 (c), S. 295 - 304.
- Lorenz, D.: Zur Problematik der Fernerkundung der Erdoberfläche mit Hilfe der thermischen Infrarot-Strahlung, BuL 6/1971, S. 235 - 242.
- Lorenz, D.: Erfahrungen bei der Auswertung und Bearbeitung von Wärmebildern, BuL 4/1973, S. 135 - 141.
- Lowe, D.S. + Stingelin, R.W.: Line Scan Devices and Why Use them, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1968, S. 77 - 106.
- Lyon, R.J.P. + Patterson, J.W.: Infrared Spectral Signatures - a Field Geological Tool, Proc. 4th Symp. on RS, Ann Arbor 1966, S. 215 - 230.
- Lyon, R.J.P. + Patterson, J.W.: Airborne Geological Mapping using Infrared Emission Spectra, Proc. 6th Symp. on RS, Ann Arbor 1969, S. 527 - 552.
- Lyon, R.J.P.: Comparison of Airborne Infrared Spectral Emittance and Radar Scatterometer Data from Pisgah Crater Lava Flow, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 1449 - 1450.
- Marlatt, W.E. + Harlan, J.C.: A Study of the Attenuation by Atmospheric Particulates of Thermal Infrared Radiation, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 1791 - 1806.
- Masry, S.E. + Gibbons, J.G.: Rectification of Infrared Imagery, Dept. of Surveying Engineering, Univ. of New Brunswick, Fredericton, N.B. Canada, XII ISP-Congress Ottawa 1972, 13 S.
- Matsuno, K. + Hase, H. + Nishimura, K.: On the IR Imagery and its Application for the Mapping of the Geothermal Distributions, Paper XI. Int. Congr. ISP, Lausanne 1968, 17 S.
- Mattson, J.O.: Thermal Patterns in the Landscape Recorded with Infrared Techniques and Simulated in Model Experiments, Lund Studies in Geogr. Ser. A, No. 46, Lund 1969, S. 219 - 237, + Stockholm Symp. on RS 1969, S. 22 - 24.
- McClellan, W.D. + Meiners, J.P. + Orr, D.G.: Spectral Reflectance Studies on Plants, Proc. 2nd Symp. on RS, Ann Arbor 1962, S. 403 - 413.
- McCullough, D.R. + Olson, Ch.E. + Queal, L.M.: Progress in Large Animal Census by Thermal Mapping, Remote Sensing in Ecology, Univ. of Georgia Press, Athens 1969, S. 138 - 147.
- McLeish, W.: The Use of an Infrared Mapper in the Study of Small-Scale Ocean Circulations, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 717 - 735.
- McLerran, J.H. + Fischer W.A. + Morgan, J.O.: Thermal Mapping of Yellowstone Park, Proc. 3rd, Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 517 - 530.
- McLerran, J.H.: Infrared Sea Ice Reconnaissance, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 789 - 802.
- McLerran, J.H.: Airborne Crevasse Detection, Selected Papers on Remote Sensing, Am. Soc. of Photogramm., Willow Run Lab. 1966, S. 145 - 146.

- McLerran, J.H.: Infrared Thermal Sensing, PE 5/1967, S. 507 - 512.
- Menon, K.V. + Ragotzkie, R.A.: Remote Sensing by Infrared and Microwave Radiometry, Univ. of Wisconsin, Madison 1967, 59 S.
- Miller, C.D.: An Airborne Spectral Radiometer, Proc. 2nd, Symp. on RS, Ann Arbor 1962, S. 359 - 373.
- Miller, D.: Location of Anomalously Hot Earth with Infrared Imagery in Yellowstone National Park, Proc. 4th Symp. on RS, Ann Arbor 1966, S. 751 - 769.
- Miller, L.D. + Cooper, Ch.F.: Analysis of Environmental and Vegetative Gradients in Yellowstone National Park from Remote Multispectral Sensing, in: Remote Sensing in Ecology, Univ. of Georgia, Press 1969, S. 108 - 131.
- Morgan, J.: Infrared Technology, Proc. 1st Symp. on RS, Ann Arbor 1962, S. 52 - 65.
- Morgan, J.O. + England, G.: Quantitative Airborne Infrared Mapping, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 681 - 690.
- Moxham, R.M. + Alcaraz, A.: Infrared Surveys at Taal Volcano, Philippines, Proc. 4th Symp. on RS, Ann Arbor 1966.
- Munday, J.C. + Penney, M.E.: Oil Slick Studies Using Photographic and Multispectral Scanner Data, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 1027 - 1044.
- Myers, V.I. + Heilman, M.D.: Thermal Infrared for Soil Temperature Studies, PE 10/1969, S. 1024 - 1032.
- Nossin, J. + de Hoop, D.: Thermal Infrared Sensing and its Potential as a Data Source, Data Collection by Remote Sensing, Chapter I, 1972, 10 S.
- Olson, Ch.E.: Infrared Sensors and Their Potential Applications to Forestry, Michigan Academy of Science, Vol L 1965 (1964 Meeting) S. 39 - 47.
- Ory, T.R.: Line-Scanning Reconnaissance Systems in Land Utilization and Terrain Studies, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 393 - 398.
- Ory, T.R.: Quantitative Energy Exchange Measurements with Infrared Scanner, Proc. ASP 37th Ann. Meeting, Falls Church 1971.
- Parker, D.C. + Wolff, M.F.: Remote Sensing, Int. Science and Technology, July 1965, 12 S. (Selected Papers on Remote Sensing, Am. Soc. of Photogramm., Willow Run Lab. 1966).
- Parker, D.C.: Remote Sensing for Engineering Investigation of Terrain - Infrared Systems, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1968, S. 701 - 710.
- Pascucci, R.F.: Comparative Contribution of Three Remote Sensors to Geologic Mapping, Proc. 37th Ann. ASP-Meeting, Falls Church 1971, S. 219 - 225.
- Pearcy, W.G. + Mueller, J.L.: Upwelling Columbia River Plume and Albacore Tuna, Proc. 6th Symp. on RS, Ann Arbor 1969, S. 1101 - 1113.
- Pease, R.W.: Mapping Terrestrial Radiation Emission with a Scanning Radiometer, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 501 - 510.
- Perlado, J.P.: An Aerial Thermography Survey of the Canary Islands, Paper XII. ISP-Congress, Ottawa 1972, 40 S.
- Peterson, J.T.: On the Distribution of Lake Temperatures in Central Canada as Observed from the Air, Univ. of Wisconsin, Madison 1965, 35 S.

- Pickett, R.L.: An Infrared Technique for Tracking the Golf Stream, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1968, S. 549 - 554.
- Pisharoty, P.R. + Hariharan, T.A.: An Infrared Scanner for India, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 19 - 24.
- Polcyn, F.C. + Spansail, N.A. + Malida, W.A.: How Multispectral Sensing Can Help the Ecologist, Remote Sensing in Ecology, Univ. of Georgia, Athens 1969, S. 194 - 218.
- Polcyn, F.C. + Weber, F.P.: Remote Sensing with Optical-Mechanical Line Scanners to Detect Stress in Forests, Proc. 37th Ann. ASP-Meeting, Falls Church 1971, S. 123 - 152.
- Poulin, A.O. + Harwood, T.A.: Infrared Imagery in the Arctic Under Daylight Conditions, Proc. 4th Symp. on RS, Ann Arbor 1966, S. 231 - 241.
- Prochaska, J.M.: The Application of Remote Sensing in the Urban Environment, Proc. 35th Ann. ASP-Meeting, Falls Church, 1969, S. 246 a - i.
- Prostak, A. + Dye, R.H.: Real-Time Infrared Spectrum Analysis for Measurement of Air Pollutants, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 843 - 844.
- Ragotzkie, R.A. + Bratnick, M.: Infrared Temperature Patterns on Lake Superior and Infrared Vertical Motions, Univ. of Wisconsin, Madison 1966, S. 349 - 357, Pub. No. 13, Great Lakes Div., Univ. of Michigan 1965.
- Ragotzkie, R.A.: The Keweenaw Current, a Regular Feature of Summer Circulation of Lake Superior, Univ. of Wisconsin, Madison 1966, 30 S.
- Rao, P.K. + Strong A.E.: Sea Surface Temperature Mapping off the Eastern U.S. Using NSDS's ITOS Satellite, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 683 - 692.
- Rohde, W.G. + Olson, Ch.E.: Detecting Tree Moisture Stress with Infrared Sensors, Proc. 35th Ann. ASP-Meeting, Falls Church 1969, S. 185 - 190.
- Sabins, F.F.: Infrared Imagery and Geologic Aspects, PE 7/1967, S. 743 - 750.
- Sabins, F.F.: Flight Planning and Navigation for Thermal-IR Surveys, PE 1/1973, S. 49 - 58.
- Salomonson, V.V.: Anisotropy of Reflected Solar Radiation from Various Surfaces as Measured with an Aircraft-Mounted Radiometer, Proc. 4th Symp. on RS, Ann Arbor 1966, S. 393 - 407.
- Salomonson, V.V. + Marlatt, W.E.: Airborne Measurements of Reflected Solar Radiation, RS 2, Vol 2, Nr. 1, 1971, S. 1 - 8.
- Saunders, P.M. + Wilkens, C.H.: Precise Airborne Radiation Thermometry, Proc. 4th Symp. on RS, Ann Arbor 1966,
- Sellin, L. + Svensson, H.: Airborne Thermography, Univ. of Lund 1970, Geoforum 2/1970, S. 49 - 60.
- Shafer, B.A. + Super, A.B.: Infrared Temperature Sensing of Snow-Covered Terrain, Montana State Univ., Bozeman-Montana, 1971, 95 S.
- Shilin, B.V. + Komarov, V.B.: Application of Infrared Aerial Recording Techniques to Studies of Volcanoes and Thermal Activities of Kamtchatka Peninsula, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1967, S. 821 (1 - 8).
- Shilin, B.V. et al: Infrared Aerial Survey of the Volcanoes of Kamtchatka, Proc. 6th Symp. on RS, Ann Arbor 1969, S. 175 - 188.

- Shockley, W.G. + Knight, S.J. + Lipscomb, E.B.: Fingerprinting Soil Parameters with an Infrared Spectrophotometer, Proc. 2nd Symp. on RS, Ann Arbor 1962, S. 267 - 288.
- Silva, L. + Hoffer, R. + Cipra, J.: Extended Wavelength Field Spectroradiometry, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 1509 - 1518.
- Skiles, J.J. + Dixon, R.S. + Grzelak, T.A. + McFadden, J.D. + Ragotzkie, R.A.: Instrumentation System for Microwave and Infrared Radiometry, Proc. 2nd Symp. on RS, Ann Arbor 1962, S. 175 - 185.
- Slavecki, R.J.: Detection and Location of Subsurface Coal Fires, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 537 - 547.
- Smith, J.T.: Oil Slick Remote Sensing, PE 12/1971, S. 1243 - 1248.
- Somerscales, E.F.C.: A Technique for the Comparison of Contact and Non-Contact Measurements of Water Surface Temperature, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 1089 - 1094.
- Suits, G.H.: The Nature of Infrared Radiation and Ways to Photograph it, PE 12/1960, S. 763 - 772.
- Suits, G.H.: Declassification of Infrared Devices, PE 6/1966, S. 988 - 992.
- Svensson, H.: Infrarödtermografi, Mitteilungen aus der Univ. Lund, Svensk Geografisk Arsbok 43, 1967, div. Beiträge von: Fagerlund, Svensson, Mattson und Linqvist, S. 155 - 225.
- Svensson, H.: CD-Film and IR-Imagery as Tools for Detecting and Studying Processes in the Ground, Stockholm Symp. on RS 1969, S. 48 - 50.
- Schafer, T.M.: Airborne Scanner Traces Thermal Pollution, Public Works Mag. Aug. 1971, 2 S.
- Schneider, S.: Environmental Control from Airborne and Space Vehicles, Paper XII. ISP-Congress Ottawa 1972, 14 S.
- Stang, F.W.: Future Trends of Infrared Sensing, 1st Annual IRSI Symp., Vol II 1969, S. 42 - 45.
- Steiner, D.: Die Jahreszeit als Faktor bei der Landnutzungsinterpretation, Landeskundliche Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum, Heft 5, Bad Godesberg 1961, 81 S.
- Steiner, D.: Quantitative Methoden, Unpubl. Vorlesungsmanuskript, Zürich 1967.
- Stingelin, R.W.: An Application of Infrared Remote Sensing to Ecological Studies, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1968, S. 435 - 440.
- Stingelin, R.W.: Airborne Thermal Scanning in Geoscience Data Acquisition, 1st Annual IRSI Symp., Vol I, Sacramento, Calif. 1969, S. 175 - 182.
- Stingelin, R.W. + Traxler, B.T.: A Quantitative Airborne Infrared Imaging System, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 1483 - 1496.
- Strangway, D.W. + Holmer, R.C.: The Search for Ore Deposits Using Thermal Radiation, Geophysics Vol XXXI, No. 1, 1966, S. 225 - 242.
- Thackrey, D.E.: Research in Infrared Sensing, Research News, Univ. of Michigan, Ann Arbor 1968, 12. S.
- U.S. Department of Agriculture: Remote Sensing for Forest Fire Control, Research Seminar, Div. of Forest Fire and Atmospheric Sciences Research, Forest Service, U.S. Dept. of Agr. 1971, div. Beiträge.
- U.S. Dept. of Defense: Image Interpretation Handbook, Vol. I, Washington 1967.

- Valovcin, F.R.: Infrared Measurements of Clouds from an U-2 Platform, Proc. 3rd Symp. on RS, Ann Arbor 1964, S. 153 - 172.
- Vincent, R.K. + Thomson, F.J.: Discrimination of Basic Silicate Rocks by Recognition Maps Processed from Aerial Infrared Data, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 247 - 252.
- Voûte, C.: "Airborne-Thermal Infrared-Scanning" und die Anwendung in der Geologie und Hydrologie, 32. Photogramm. Wochen Karlsruhe 1969, 2 S.
- Wark, D.Q. + Yamamoto, G. + Lienesch, J.H.: Methods of Estimating Infrared Flux and Surface Temperature from Meteorological Satellites, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol 19, No. 5, 1962, S. 369 - 384.
- Warren, C.: Airborne Use of the AGA-Thermovision Real Time Infrared Scanner, Proc. 36th Ann. ASP-Meeting, Falls Church 1970, S. 471 - 483.
- Watson, K. + Rowan, L.C. + Offield, T.W.: Application of Thermal Modeling in the Geologic Interpretation of IR Images, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 2017 - 2042.
- Watson, K. + Rowan, L.C.: Automated Geologic Mapping Using Rock Reflectances, Proc. 7th Symp. on RS, Ann Arbor 1971, S. 2043 - 2054.
- Weaver, D.K. + Butler, W.E. + Olson, Ch.E.: Observations on Interpretation of Vegetation from Infrared Imagery, Remote Sensing in Ecology, Univ. of Georgia, Athens 1969, S. 132 - 137.
- Weiss, M.: Earth and Sea Surface Temperature Measurements Using Infrared, Proc. 2nd Symp. on RS, Ann Arbor 1962, S. 343 - 357.
- Weiss, I.M. + Mather, G.K.: Evaluation of an Infrared Spectrometer as a Clear Air Turbulence Detector, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1968, S. 587 - 608.
- Weiss, M.: Aspects of Data Acquisition and Handling in Infrared Remote Sensing Instrumentation, 1st Annual IRSI Symp. Vol I., Sacramento, Calif. 1969, S. 234 - 251.
- Wendland, W.M. + Bryson, R.A.: Aerial Survey of Hudson Bay Surface Temperature, Univ. of Wisconsin, Madison 1966, 30 S.
- Wendland, W.M. + Bryson, R.A.: Surface Temperature Patterns of Hudson Bay from Aerial Infrared Surveys, Remote Sensing in Ecology, Univ. of Georgia, Athens 1969, S. 185 - 193.
- Wiegand, C.L. + Heilman, M.D. + Gerbermann, A.H.: Detailed Plant and Soil Thermal Regime in Agronomy, Soil and Water Conservation Div., Agricultural Res. Service, U.S. Dept. of Agriculture, Weslaco, Texas 1966, S. 325 - 342.
- Williams, R.S. + Ory, R. T.: Infrared Imagery Mosaics for Geological Investigations, PE 12/1967, S. 1377 - 1280.
- Williams, R.S. + Friedman, J.D.: Satellite Observation of Effusive Volcanism, Journal of the British Interplanetary Society, Vol 23 1970, S. 441 - 450.
- Williams, R.S.: Thermography, PE 9/1972, S. 881 - 883.
- Wilson, J.E.: Ground Truth Procedures for Aiding Interpretation of Remote Sensor Data, Proc. 34th Ann. ASP-Meeting, Falls Church 1968, S. 365 - 375.
- Wilson, R.A.: Fire Detection Feasibility Tests and System Development, Proc. 5th Symp. on RS, Ann Arbor 1968, S. 465 - 478.

Wolfe, W.L.Ed.: Handbook of Military Infrared Technology, Office of Naval Research, Dept. of the Navy, Washington 1965, 906 S.

Wolfe, E.W.: Thermal IR for Geology, PE 1/1971, S. 43 - 52.

Wood, Ch.R.: Evidences of Ground-Water Flow into the Lehigh River, Proc. 37th Ann. ASP-Meeting, Falls Church 1971, S. 245 - 257.

Wood, Ch.R.: Ground-Water Flow, PE 4/1971, S. 347 - 352.

CURRICULUM VITAE

Am 7. Februar 1944 wurde ich, Nikolaus Immanuel Itten, Bürger von Spiez/BE, in Zürich geboren. Nach dem Besuch von 6 Jahren Primar- und 3 Jahren Sekundarschule in Zürich, absolvierte ich die Kantonale Zürcherische Oberrealschule, die ich nach 4 1/2 Jahren, im Herbst 1963, mit der Maturität Typ C abschloss. Im Wintersemester 1964/65 immatrikulierte ich mich an der Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich. Nach den Vordiplomprüfungen in Botanik, Mathematik, Zoologie und Wirtschaftsgeographie, erlangte ich im Mai 1969 das Diplom als Naturwissenschaftler mit Schlussprüfungen in Geographie und Geologie.

Vom September 1967 an war ich als Assistent unter Prof. Dr. D. Steiner am Geographischen Institut der Universität Zürich angestellt und bekleide seit September 1968 dort eine Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter unter den Herren Professoren Dr. H. Boesch und Dr. H. Haefner.

Die vorliegende Dissertation entstand unter der Leitung von Prof. Dr. H. Haefner.

Bei den folgenden Professoren und Dozenten besuchte ich Vorlesungen, Übungen und Exkursionen:

Geographie:	Andresen, Bachmann, Boesch, Bögli, Furrer, Gensler, Gutersohn, Guyan, Haefner, Henking, Schüepp, Suter, Steffen, Steiner, Tobler, Ulrich, Winkler.
Geologie:	Dal Vesco, Dünner, Gansser, Jäckli, Trümpy.
Zoologie:	Burla, Hadorn, Tardent, Wagner, Ziswiler.
Botanik:	Rutishauser, Wanner.
Mathematik und EDV:	Bauknecht, van der Waerden.
Photogrammetrie:	Kasper.
Geschichte:	v. Albertini, Beck, Schwarz.
Wirtschaftsgeschichte u. Wirtschaftspolitik:	Büchner, Halpérin, Silberschmidt.
Soziologie:	Heintz, Hoffmann-Nowotny.
Didaktik, Pädagogik u. Psychologie:	Graber, Nigg, Woodtli.

